

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE  
M. Ing.

PAR  
PATRICK ROBILLARD

INTÉGRATION DE L'IMPACT DES ÉLÉMENTS DE LA QUALITÉ  
DANS LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE D'UNE CHAÎNE  
D'APPROVISIONNEMENT MULTI PRODUITS

MONTREAL, LE 15 AVRIL, 2005

© droits réservés de Patrick Robillard

CE PROJET SERA ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

- M. Youssef A. Youssef, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure
- M. Ali Gharbi, directeur de projet  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure
- M. Claude Olivier, codirecteur  
Direction de la recherche et de l'enseignement à l'École de technologie supérieure
- M. Michel Rioux, professeur  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET UN PUBLIC  
LE 6 JANVIER 2005  
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **INTÉGRATION DE L'IMPACT DES ÉLÉMENTS DE LA QUALITÉ DANS LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE D'UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT MULTI PRODUITS**

Patrick Robillard

## **RÉSUMÉ**

Ce projet porte sur la conception d'une chaîne d'approvisionnement dans laquelle circulera des produits entre plusieurs étapes de production. L'aspect important de notre sujet de recherche correspond à la réduction des coûts de la qualité par la sélection des stratégies d'inspection la plus économique à travers la détermination d'un réseau. La résolution de ce problème en programmation linéaire fait appel à des coûts de production, de transport et de la qualité d'un réseau manufacturier fabriquant une gamme de produits.

Ainsi, dans la première partie du projet, nous quantifions les coûts de la qualité en termes de coûts d'inspection et de coûts de non-conformité des pièces. Conséquemment, dans l'optique de chiffrer ces coûts, nous ferons appel aux notions de plan d'échantillonnage. Après quoi, nous intégrerons les coûts de contrôle et de non-conformité à un modèle de programmation linéaire. Un modèle mathématique incluant les contraintes du système sera présenté. Ces contraintes correspondent à une demande spécifique, un balancement de flux entrant et sortant des processeurs et aux capacités des processeurs.

La deuxième partie du projet sera consacrée à l'application d'une approche empirique basée sur la planification d'expériences et l'analyse statistique en vue d'identifier les stratégies d'inspection qui minimisent les coûts totaux. Cette approche nous permettra d'analyser l'influence de la variation des tailles de lots et des coûts de la qualité sur les coûts totaux résultant du modèle de conception.

# **INTEGRATION OF THE EVALUATION OF QUALITY IN THE STRATEGIC PLANNING OF A MULTI PRODUCTS MANUFACTURING NETWORK**

Patrick Robillard

## **ABSTRACT**

This project relates to the design of a supply chain in which will circulate components between several stages of production. The important aspect of our subject of research corresponds to the reduction of the costs of quality by the selection of the most economic inspection strategies through the determination of a network. The resolution of this problem in linear programming calls upon production costs, transport and quality of a manufacturing network that produces a line of goods.

Thus, in the first part of the project, we quantify the cost of quality in terms of costs of inspection and nonconformity of the parts. Consequently, in optic to quantify these costs, we will call upon the notions of the sampling plans. After which, we will integrate the costs of control and nonconformity into a model of linear programming. A mathematical model including the constraints of the system will be presented.

The second part of the project will be focused on the application of an empirical approach based on design of experiments and the statistical analysis in order to identify the strategies of inspection, which minimize the total costs. This approach will enable us to analyze the influence of the variation of the batches sizes and the costs of quality on the total costs of the model of planning.

# **INTÉGRATION DE L'IMPACT DES ÉLÉMENTS DE LA QUALITÉ DANS LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE D'UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT MULTI PRODUITS**

Patrick Robillard

## **SOMMAIRE**

Ce projet porte sur la conception d'une chaîne d'approvisionnement dans laquelle circulera des produits entre plusieurs étapes de production. L'aspect important de notre sujet de recherche correspond à la réduction des coûts de la qualité par la sélection des stratégies d'inspection la plus économique à travers la détermination d'un réseau. La résolution de ce problème en programmation linéaire fait appel à des coûts de production, de transport et de qualité d'un réseau manufacturier fabriquant une gamme de produits.

Ainsi, dans la première partie du projet, nous quantifions les coûts de la qualité en termes de coûts d'inspection et de coûts de non-conformité des pièces. Conséquemment, dans l'optique de chiffrer ces coûts, nous ferons appel aux notions de plan d'échantillonnage. Après quoi, nous intégrerons les coûts de contrôle et de non-conformité à un modèle de programmation linéaire. Un modèle mathématique incluant les contraintes du système sera présenté. Ces contraintes correspondent à une demande spécifique, un balancement de flux entrant et sortant des processeurs et aux capacités des processeurs.

La deuxième partie du projet sera consacrée à l'application d'une approche empirique basée sur la planification d'expériences et l'analyse statistique en vue d'identifier les stratégies d'inspection qui minimisent les coûts totaux. Cette approche nous permettra d'analyser l'influence de la variation des tailles de lots et des coûts de la qualité sur les coûts totaux résultant du modèle de conception.

## REMERCIEMENTS

C'est un grand plaisir pour moi d'exprimer ma gratitude à mon directeur Ali Gharbi, professeur de l'ÉTS et mon co-directeur Claude Olivier, directeur de l'enseignement et la recherche de l'ÉTS pour leurs conseils, leurs encouragements, leur générosité et leurs soutiens financiers au cours de mes études à la maîtrise. J'ai eu un grand privilège d'avoir complété ce mémoire sous leur supervision au laboratoire  $C^2SP$ . J'en retire de précieux bénéfices. De plus, j'aimerais exprimer mon appréciation sincère à la personne qui m'a donné avec générosité et qui par son engagement a fait ressortir le maximum de mon potentiel, M.Youssef A.Youssef.

Je remercie tous mes collègues du laboratoire pour leurs soutiens et tout particulièrement celui de Stéphanie pour ses conseils et le partage de ses connaissances.

Je souhaite exprimer mon appréciation à mes parents, Roger, Élisabeth, mes sœurs et ma nièce pour leur soutien moral. J'ai des remerciements spéciaux pour mes amis Amine, Brigitte, Chantal, Dominique, François, Marc, Mauro et Patrick pour leurs présences et leurs encouragements.

Merci à tous.

## TABLE DES MATIÈRES

	Pages
SOMMAIRE .....	i
ABSTRACT .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
TABLE DES MATIÈRES .....	iii
LISTE DES TABLEAUX .....	vi
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES .....	ix
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	11
1.1 Introduction .....	11
1.2 Problématique et objectifs de la recherche.....	12
1.3 Revue de littérature.....	14
1.3.1 Approches de conception de systèmes manufacturiers.....	14
1.3.2 Intérêt d'évaluer la qualité des fournisseurs .....	18
1.3.3 Constats.....	20
1.4 Démarche conceptuelle.....	21
1.5 Hypothèses de travail.....	23
1.6 Structure du mémoire.....	23
1.7 Contributions de la recherche.....	24
1.8 Conclusion .....	25
CHAPITRE 2 CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT ET MODÉLISATION.....	26
2.1 Introduction .....	26
2.2 Définition, gestion et structure d'une chaîne d'approvisionnement .....	26
2.3 Fonctions et défis de la logistique .....	29
2.4 Définition général d'un modèle .....	29
2.5 Modèle mathématique.....	30
2.5.1 Programmation stochastique.....	31
2.5.2 Programmation non linéaire .....	32
2.5.3 Programmation multiobjectifs .....	33
2.5.4 Programmation linéaire .....	34
2.6 Simulation .....	35
2.7 Planification d'expériences.....	36
2.7.1 Comparaisons des plans d'expérimentations classiques et de Taguchi ...	37
2.7.2 Plans factoriels.....	38

2.7.3	Analyse statistique .....	39
2.8	Techniques d'échantillonnage .....	40
2.8.1	Normes d'échantillonnage pour contrôle par attributs .....	40
2.9	Coût de la qualité .....	41
2.10	Conclusion .....	42
<b>CHAPITRE 3 FORMULATION DU PROBLÈME ET APPROCHE DE RÉOLUTION .....</b>		<b>44</b>
3.1	Introduction .....	44
3.2	Effet de la variation du niveau de la qualité .....	45
3.3	Minimisation du nombre moyen d'inspections .....	46
3.4	Choix d'un plan robuste et économique .....	47
3.4.1	Notations .....	48
3.4.2	Relations mathématiques .....	49
3.5	Modèle de conception d'un réseau .....	49
3.5.1	Interaction du niveau de qualité entre les échelons .....	50
3.5.2	Indexation du coût moyen d'inspection .....	51
3.5.3	Indexation du coût moyen de non-conformité .....	52
3.5.4	Notations .....	52
3.5.5	Description des équations .....	55
3.5.6	Approche de résolutions .....	56
3.6	Plan d'inspection double .....	57
3.6.1	Paramètres d'évaluation de la qualité .....	57
3.7	Conclusion .....	58
<b>CHAPITRE 4 APPLICATION DU MODÈLE DE PLANIFICATION .....</b>		<b>59</b>
4.1	Introduction .....	59
4.2	Définition du produit .....	59
4.3	Construction du modèle .....	62
4.4	Résultat du modèle de planification du réseau .....	63
4.5	Résultats présentés par réseaux manufacturiers virtuels .....	67
4.6	Interaction des niveaux de qualité entre échelons .....	72
4.7	Conclusion .....	74
<b>CHAPITRE 5 APPROCHE EMPIRIQUE ET STRATÉGIE D'INSPECTION .....</b>		<b>75</b>
5.1	Introduction .....	75
5.2	Méthodologie .....	76
5.3	Méthodes d'évaluation de la qualité des lots .....	77
5.3.1	Points d'équilibre .....	77
5.3.2	Interactions des échelons .....	78
5.4	Préparation des expérimentations .....	78
5.5	Expérimentation avec des plans d'échantillonnage .....	79
5.5.1	Analyse des plans d'échantillonnage .....	81
5.5.2	Choix du plan d'expériences .....	83



5.5.3	Randomisation des essais .....	83
5.5.4	Analyse statistique de l'ensemble des facteurs .....	84
5.5.5	Analyse statistique des facteurs significatifs .....	86
5.5.6	Homogénéité des variances .....	87
5.5.7	Résidus du modèle .....	87
5.5.8	Modèle de régression du coût total.....	89
5.5.9	Interprétation des résultats .....	89
5.6	Plan de raffinement .....	90
5.6.1	Analyse des plans d'échantillonnage.....	90
5.6.2	Sélection du plan d'expériences .....	91
5.7	Analyse de sensibilité .....	93
5.7.1	Influence de la taille du lot sur les coûts totaux .....	93
5.7.2	Variation des coûts du réseau .....	95
5.7.3	Comparaison entre les stratégies d'inspection .....	96
5.8	Conclusion .....	97
CONCLUSION .....		98
ANNEXES :		
1.	Lexiques des coûts de la qualité .....	102
2.	Modèle de planification et fichiers de données .....	105
3.	Données des coûts de la qualité .....	116
4.	Résultats du modèle agrégé .....	123
5.	Valeurs des essais des plans d'expérimentation .....	151
BIBLIOGRAPHIE.....		154

## LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau I	Modèles de décision par classe d'incertitude..... 31
Tableau II	Coût de la qualité du produit chez le client ..... 42
Tableau III	Plans d'échantillonnage simple assurant un LTPD de 5%..... 46
Tableau IV	Notation des plans d'échantillon ..... 48
Tableau V	Notation du modèle de conception ..... 53
Tableau VI	Modèle mathématique de conception d'un réseau..... 54
Tableau VII	Nomenclature de pièces des tableaux de bord..... 60
Tableau VIII	Spécification générique du procédé des fournisseurs..... 61
Tableau IX	Planification des charges de production, AOQL de 1%..... 64
Tableau X	Planification des flux avec un AOQL de 1%..... 66
Tableau XI	Plans d'échantillonnage (n, c) caractérisé par AOQL ..... 79
Tableau XII	Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 0.1%..... 82
Tableau XIII	Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 1.5%..... 82
Tableau XIV	Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 3..... 82
Tableau XV	Spécification du plan Box-Bhenken ..... 83
Tableau XVI	ANOVA des expériences du système manufacturier ..... 84
Tableau XVII	ANOVA des facteurs significatifs ..... 86
Tableau XVIII	Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 1%..... 90
Tableau XIX	Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 2%..... 91
Tableau XX	Spécification du plan factoriel à plusieurs niveaux..... 91
Tableau XXI	ANOVA des inspections pour l'échelon 3 et 4 ..... 92
Tableau XXII	Coût d'un réseau en fonction des stratégies d'évaluation de la qualité ..... 97

## LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1	Niveaux considérés du système manufacturier..... 13
Figure 2	Système manufacturier sous étude ..... 13
Figure 3	Vu d'ensemble de l'approche <i>Netman</i> (Montreuil et al., 2000) ..... 17
Figure 4	Lien entre les trois outils..... 21
Figure 5	Flux de données du processus de l'attribution des charges..... 22
Figure 6	Processus d'une chaîne d'approvisionnement ..... 27
Figure 7	Vu d'ensemble d'une chaîne logistique (Simchi-Levi et al., 1999) .... 28
Figure 8	Types de structures des réseaux manufacturiers ..... 28
Figure 9	Interactions entre un modèle et ses contraintes effectives..... 30
Figure 10	Étapes d'une étude de simulation (Pritsker et al., 1999)..... 35
Figure 11	Structure conceptuelle d'un système ..... 37
Figure 12	Variation de niveau AOQ en fonction de $p$ (Dodge Romig, 1959) ..... 45
Figure 13	Processus d'inspection rectifiant (Dodge Romig, 1959)..... 47
Figure 14	Relations déterminantes des coûts $C^I$ et $C^D$ ..... 50
Figure 15	Étapes de résolution..... 56
Figure 16	Gamme de fabrication des tableaux de bord ..... 60
Figure 17	Nomenclature du tableau de bord de type C ..... 61
Figure 18	Légende du réseau manufacturier virtuel VMN..... 68
Figure 19	VMN du produit A ..... 69
Figure 20	VMN du produit B ..... 69
Figure 21	VMN du produit C..... 70
Figure 22	VMN du produit D..... 70
Figure 23	VMN du produit E ..... 71
Figure 24	VMN du produit F ..... 71
Figure 25	Légende VNM avec interaction de la qualité d'un réseau ..... 72
Figure 26	Niveau de qualité et interaction, produit A ..... 73

Figure 27	Méthodologie de planification d'un réseau manufacturier .....	76
Figure 28	Diagramme expérimental .....	79
Figure 29	Courbe OC des plans AOQL 0.1%, 1.5% et 3% .....	80
Figure 30	Courbe I des plans, AOQL 0.1%, 1.5% et 3% .....	80
Figure 31	Courbe AOQ des plans AOQL 0.1%, 1.5% et 3%.....	81
Figure 32	Diagramme de Pareto de la signification des facteurs .....	84
Figure 33	Surface de réponse des inspections de l'échelon 1 et 2 .....	85
Figure 34	Surface de réponse des inspections de l'échelon 3 et 4 .....	85
Figure 35	Pareto des facteurs significatifs .....	86
Figure 36	Résultats observés en relation avec les résultats prédits.....	87
Figure 37	Distribution de la normalité des résidus .....	88
Figure 38	Distribution des résidus du modèle.....	88
Figure 39	Comportement des effets principaux .....	89
Figure 40	Surface de réponse du plan de raffinement.....	92
Figure 41	Surface de réponse du plan de raffinement.....	93
Figure 42	Nombre d'inspections en fonction de la taille du lot .....	94
Figure 43	Coût total et variation à 50 % du coût d'inspection .....	95
Figure 44	Coût total et variation à 150 % du coût d'inspection .....	96

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

ANSI	American National Standard Institute
AOQ	Average Outgoing Quality
AOQL	Average Outgoing Quality Limite
AQL	Acceptable Quality Level
ASQ	American Society for Quality
CCSP	Conception et Contrôle des Systèmes de Production
CENTOR	Centre de recherche sur les Technologies de l'organisation Réseau
DCA	Discrete Choice Analysis
FMS	Flexible Manufacturing System
GRG	Gradient Réduit Généralisé
GSCM	Global Supply Chain Model
JIT	Just In Time
LTPD	Lot Tolerance Percent Defective
OC	Operating Characteristic
SMN	Symbiotic Manufacturer Network
TQM	Total Quality Management
SUMT	Sequencial Unconstrained Minimization Technique
C1..C6	Processeurs d'assemblage final
G1..G5	Processeurs d'assemblage d'indicateurs généraux
G	Indicateur général
S1..S5	Processeurs d'assemblage d'indicateurs de vitesse
S	Indicateur de vitesse
T1..T3	Processeurs d'assemblage de tachymètre
T	Tachymètre
AS1, AS2	Processeurs de fabrication de sous composant (a) pour [S]
AS	sous composant (a) pour [S]
AT1, AT2	Processeurs de fabrication de sous composant (a) pour [T]

AT	sous composant (a) pour [T]
B1..B6	Processeurs de fabrication de bobines
B	Bobine
BS	Processeurs d'assemblage de sous composant (b) pour [S] (ou sous composant (b) pour [S])
BT	Processeurs d'assemblage de sous composant (b) pour [T] (ou sous composant (b) pour [T])
<	Plus petit que
≤	Plus petit ou égal à
>	Plus grand que
≥	Plus grand ou égal à
==	Est égal à
=	Prend la valeur de
!=	Est différent de
Σ	Sommation
%	Pourcentage
∀	S'applique à tous

## **CHAPITRE 1**

### **PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE**

#### **1.1 Introduction**

Au cours des dernières décénies, le développement des moyens de communication électronique, l'expansion des moyens de transport et l'ouverture des marchés ont favorisé l'émergence d'une concurrence internationale. Pour ces raisons, le concept de chaîne d'approvisionnement a pris beaucoup d'importance dans la gestion des entreprises. Or, ces entreprises ont orienté la performance de leurs systèmes, sur la réduction des délais d'approvisionnement, l'amélioration de la qualité des produits, la réduction des coûts de production et la personnalisation des produits offerts pour rencontrer la demande des consommateurs (Cahill et Gophal 1992).

De façon à atteindre ces objectifs de performance, les manufacturiers se sont vus dans l'obligation d'utiliser plus efficacement leurs ressources. Le génie des opérations a ainsi développé des outils de prévision des ventes, de planification de la production, de contrôle des inventaires et d'ordonnancement des opérations afin de garantir la gestion efficace des ressources.

Cependant, qu'arrive-t-il lorsque la qualité est déficiente? Un niveau de qualité inférieur aux spécifications du client entraîne des coûts de rejet, des traitements supplémentaires de planification, diminue les capacités de production, augmentent les inventaires, affecte la renommé du produit et sa compétitivité sur les marchés. Conséquemment, lors de la conception d'une chaîne logistique, le choix des fournisseurs repose sur l'évaluation de leur capacité respective à livrer un produit conforme aux spécifications du client en terme de coût, de qualité et de délais.

Dans cette perspective, la conception d'un réseau assujetti à la complexité du produit, aux contraintes de capacité de production et aux coûts des opérations stimule depuis

deux décennies la recherche. Il s'agit de ce type de conception que nous allons aborder dans le cadre de ce travail.

## **1.2 Problématique et objectifs de la recherche**

Le système manufacturier sur lequel nous nous concentrons représente plusieurs installations de production à l'intérieur desquelles sont fabriqués plusieurs produits ayant des nomenclatures différentes. C'est à l'intérieur de ce réseau disponible qu'il existe plusieurs choix de sélection des sous-traitants de manière à établir un patron de flux et de charge. Dans ce contexte, le premier objectif de cette recherche est d'explorer et de sélectionner les méthodes économiques d'évaluation de la qualité en terme d'acceptation et de rejet des produits. Le deuxième objectif est d'inclure des paramètres de coûts de la qualité dans la planification d'un réseau manufacturier multiproduits. Le dernier objectif est de développer une approche qui permette d'établir la localisation des points d'évaluation de la qualité à l'intérieur des étapes de production, l'attribution des charges de production et de la détermination des patrons de flux en effectuant un arbitrage entre les coûts des opérations et les coûts de la qualité. De ce fait, l'approche de résolution systémique est privilégiée à l'approche séquentielle de façon à considérer le système logistique dans son ensemble.

Parallèlement, nous allons considérer des contraintes de d'équilibrage de flux entre les échelons du système, des contraintes de capacité et des paramètres relatifs aux coûts de transport, de production et de qualité. Il est dans notre optique de minimiser les coûts totaux du système tout en répondant aux exigences des clients, exprimées par la demande. La figure 1 présente les niveaux considérés du système manufacturier. En sommes, l'étude des différents paramètres permettra d'assigner la fabrication des produits aux usines de transformation. À l'intérieur des quantités d'unités échangées, associés aux différentes demandes des produits, un nombre moyen de pièces sera inspecté et parmi celles-ci, certaines non-conformes échappera au contrôle pour se retrouver aux étapes en aval.



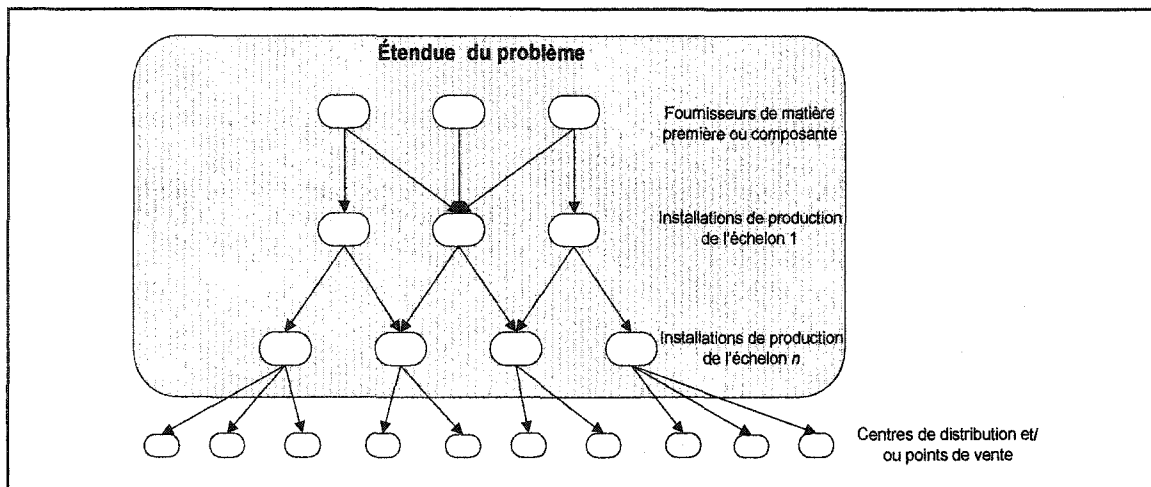


Figure 1 Niveaux considérés du système manufacturier

Les éléments du système manufacturier considérés ainsi que les coûts associés sont illustrés dans la figure 2. Les nœuds du réseaux représentent les fournisseurs et sous-traitants potentiels du réseaux et les arcs représentent le cheminement des composants entre les nœuds.

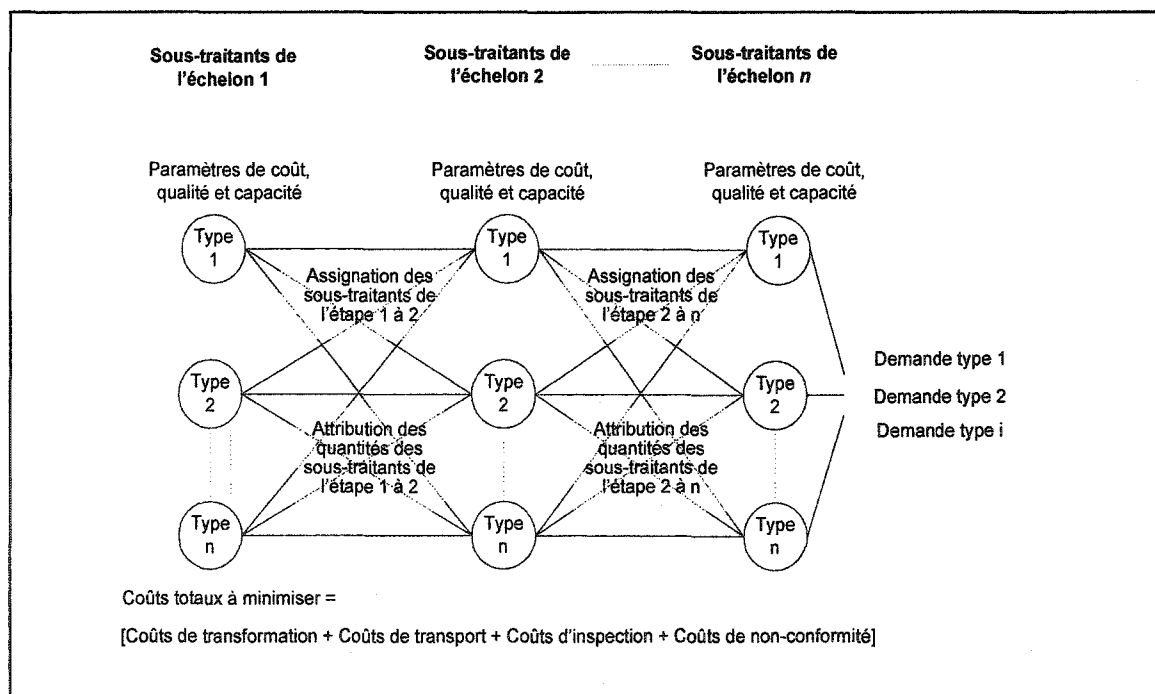


Figure 2 Système manufacturier sous étude

Afin de situer notre démarche conceptuelle, la prochaine section propose une revue de littérature des approches de conception de réseaux manufacturiers et des méthodes d'évaluation de la qualité des fournisseurs.

### **1.3 Revue de littérature**

Cette section exposera une revue de littérature divisée en deux parties. La première partie présentera des recherches qui ont contribué à la modélisation et la résolution des problèmes de conception de système manufacturier au niveau de la planification de la production.

La deuxième partie présentera des études portant sur l'évaluation de la qualité dans la sélection des fournisseurs. Des recherches empiriques et conceptuelles sont exposées pour démontrer l'intérêt de considérer la qualité comme critère dans la sélection des fournisseurs. Dans cette perspective, nous y présenterons des approches quantitatives de sélection des fournisseurs en tenant compte de la qualité des produits.

#### **1.3.1 Approches de conception de systèmes manufacturiers**

Un des premiers problèmes qui considère plusieurs échelons d'un réseau logistique provient d'études militaires. Il s'agissait de la gestion de l'inventaire du matériel des forces armées américaines après la seconde guerre mondiale. Conséquemment, des modèles de gestion de l'inventaire furent développés pour identifier des niveaux du stock désiré qui assurait un niveau de service souhaité.

Dans une perspective systémique, Anderson et al. (1975) ainsi que Miles et Snow (1978) ont introduit l'organisation en réseau. Ils ont porté leur attention sur la planification de la production, de la distribution et du contrôle des systèmes d'inventaire dans un processus manufacturier à plusieurs niveaux. Depuis lors, beaucoup d'efforts furent orientés sur la planification intégrée de la production et de la distribution avec un objectif de minimisation des coûts. Parmi les premiers, William (1981) développa

plusieurs heuristiques utilisant des coûts d'inventaire et des coûts de commande. Ensuite, les recherches de Ishii et al. (1988) ont présenté une approche de détermination du niveau de stock associé au délai d'approvisionnement. Le modèle développé permettait de prévenir les pénuries et de minimiser les inventaires à chacun des échelons d'un réseau tout en considérant les arrêts de la production. Parmi un ensemble de modèle, Cohen et Lee (1989) se sont concentrés sur la maximisation des profits après taxes d'un système intégré de production et de distribution.

Quant à Cohen et Moon (1991), ils se sont intéressés à l'assignation de la production de différentes gammes des produits aux usines disponibles. Ils ont formulé un modèle incluant plusieurs produits et plusieurs usines. Des coûts fixes étaient engendrés lors de la sélection d'une usine pour laquelle les coûts variables de production évoluaient proportionnellement au volume attribué. Conséquemment, les économies d'échelle étaient considérées dans un modèle mathématique de programmation mixte.

Reposant sur la localisation des centres de distributions, les recherches de Camm (1997) ont proposé un modèle assignant ces centres aux clients. Le programme en nombre entier développé pour la compagnie Procter and Gamble était sujet à des contraintes de zones par client et d'attribution de ces derniers à un nombre maximum de distributeurs limités en capacité.

À l'intérieur d'un modèle plus exhaustif, Artzen et al. (1995) ont déterminé des stratégies de production et de distribution utilisant un modèle global de chaîne d'approvisionnement (*GSCM*). Le modèle permettait de consolider des indicateurs de coûts et de délais de façon à minimiser le nombre d'activités par jour et le coût total de production. Les contraintes représentaient des restrictions d'échange local, des capacités agrégées par gamme de produits, un nombre d'échelons du réseau et un nombre de périodes limitées. Le modèle développé en programmation linéaire mixte incluait pour différents produits, des paramètres de coûts (fixes et variables) de production, d'inventaire et de distribution.

### 1.3.1.1 Planification stratégique et opérationnelle

Depuis le développement des moyens de communication électroniques, les réseaux manufacturiers ont pris une importance croissante dans la recherche. Dans cette tendance, le *CENTOR* (*Centre de recherche sur les Technologies de L'Organisation Réseau*<sup>1</sup>) a développé des approches portant sur la planification stratégique et opérationnelle simultanée. À l'intérieur de ces travaux, D'Amours et al. (1997) ont résolu un problème de planification et d'ordonnancement de production à plusieurs produits utilisant le concept de réseau manufacturier symbiotique *SMN*.

Hisham S. (1998) ajoutait à la littérature une structure de modèle multiobjectifs pour de la planification stratégique et opérationnelle simultanée d'une chaîne d'approvisionnement. Leurs analyses utilisaient un système de mesures incluant des coûts, des niveaux de service par clients et de flexibilité des volumes de livraison. Ce système de mesures donnait une compréhension des indicateurs de performance et de leurs interrelations dans l'agencement d'une chaîne d'approvisionnement.

À l'intérieur des recherches dans le laboratoire de *Conception et Contrôle de Système de Production*<sup>2</sup>, Hurtubise et al. (2000) utilisait les réseaux manufacturiers virtuels (*Virtual Manufacturer Network VNM*) pour introduire la sélection des soumissions des firmes d'une chaîne d'approvisionnement. L'utilisation de modèles linéaires générerait une planification de production afin de comparer différentes configurations de réseaux manufacturiers.

Au niveau de la conception et le contrôle au quotidien dans un environnement dynamique, les recherches de Montreuil et al. (2000) exposait une structure stratégique et opérationnelle de conception d'un réseau manufacturier agile. Une approche d'implantation opérationnelle journalière y est exposée avec l'utilisation de l'approche *Netman*, telle qu'illustré à la figure 3 de la page suivante.

---

<sup>1</sup> Affilié à l'Université Laval, Québec (Québec)

<sup>2</sup> Affilié à l'École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal (Québec)

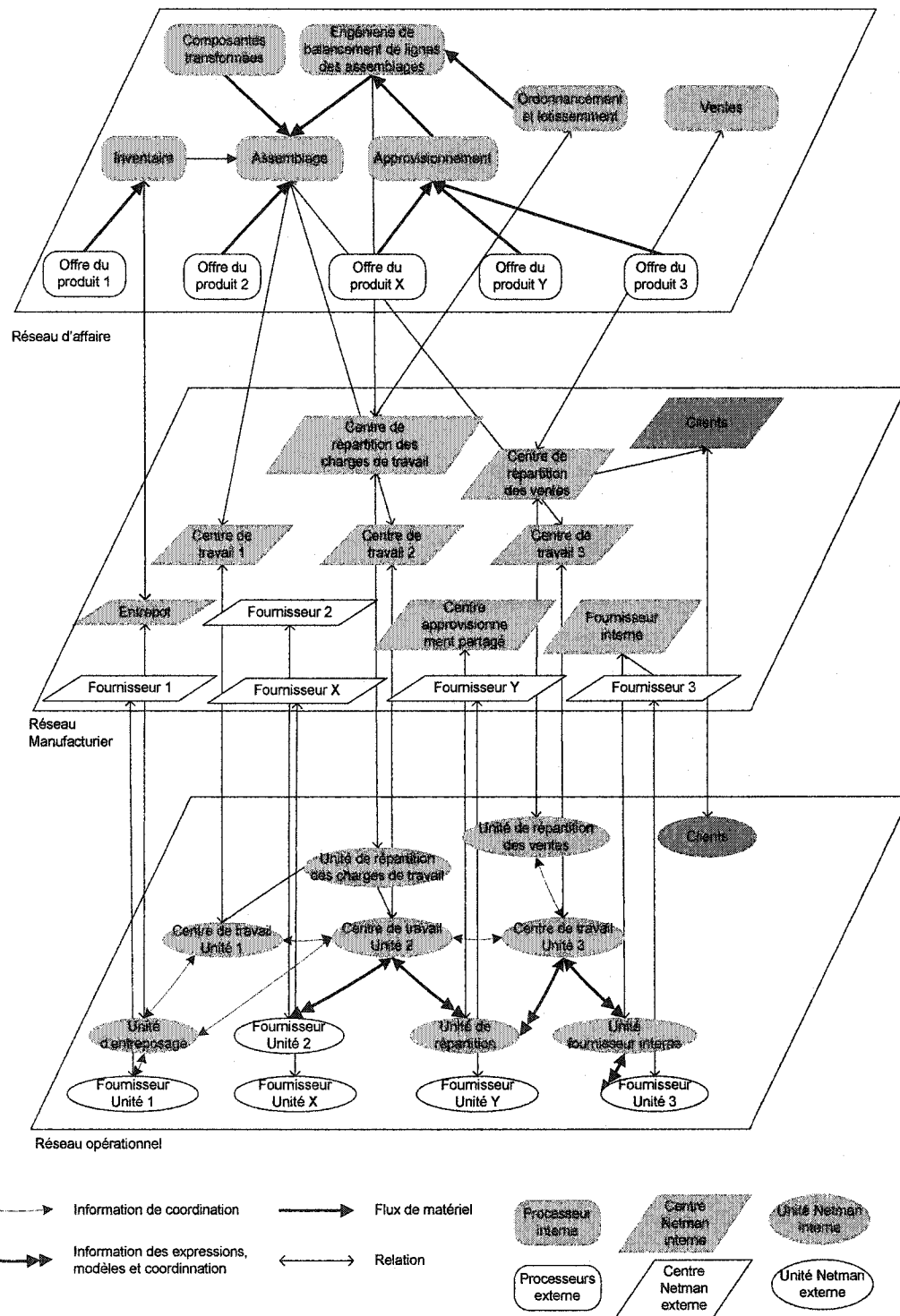


Figure 3 Vu d'ensemble de l'approche Netman (Montreuil et al., 2000)

Pour sa part, l'approche de Martel et al. (2003) détermine les usines à mettre en opération parmi un ensemble potentiel, l'utilisation des processeurs utiles à la fabrication des produits et la structure du réseau. La contribution de leur méthodologie correspondait à la prise en compte des compétences des ressources humaines pour la sélection du type de travailleur exécutant différentes tâches.

Finalement, nous référons Goetschalckx et Vidal (2002) qui fournissent une revue complète des modèles de conceptions des chaînes d'approvisionnement qui converge sur la modélisation stratégique de la production et de la distribution. Dans la prochaine section, nous examinerons l'intérêt suscité par la sélection des fournisseurs.

### **1.3.2 Intérêt d'évaluer la qualité des fournisseurs**

La sélection des fournisseurs par l'entremise des indicateurs de performance significatifs est un processus difficile compte tenu de la complexité des systèmes et de la quantité des mesures existantes. Dans les années 60, G.W. Dickson (1966) avait identifié plus d'une vingtaine d'attributs sur lesquelles les concepteurs devraient faire des compromis lorsqu'ils choisissent des fournisseurs. Depuis, un grand nombre de recherches conceptuelles et empiriques sont apparues.

Parmi celles-ci, les résultats de Verma et al. (1998) ont démontré que la qualité est l'attribut le plus important dans la sélection d'un fournisseur. Ils ont utilisé l'échelle *Likert* pour l'évaluation de l'importance des attributs des fournisseurs et la méthode *Discrete Choice Analysis (DCA)* pour évaluer les critères de sélection des fournisseurs.

Dans l'article de Mangiameli et al. (1999), on y étudiait le niveau de qualité exigé entre les échelons d'un réseau et la façon dont les entreprises imposaient leurs spécifications du produit sur chacun des fournisseurs en amont. L'étude réalisée pour *Whirlpool*, présentait son processus de demande d'actions correctives envers sa division *Stanley Engineered Components (SEC)* et ce dernier envers ses fournisseurs. Les recherches

concluent qu'il existait un manque de compréhension concernant l'effet de la qualité entre les différents niveaux du réseau.

Ainsi, de manière à améliorer le niveau de compréhension, il est nécessaire de quantifier le niveau de la qualité échangé entre les intervenants et l'inspection par échantillonnage représente un processus d'évaluation de la conformité des lots échangés (Deming, 1986). Située entre les fournisseurs externes, les clients internes et le service de l'approvisionnement, l'évaluation de la qualité constitue un outil de communication et un avantage indispensable dans un système orienté vers l'amélioration des procédés. Ainsi, l'information générée par la collecte de données de l'inspection peut avantageusement être utilisée par le concepteur d'une chaîne d'approvisionnement pour améliorer la qualité du processus manufacturier et du produit final. Cette collecte de données contribue à long terme à l'amélioration des échanges des entreprises en réseaux (D'Amours et al., 1993).

### **1.3.2.1 Approches quantitatives de sélection des fournisseurs**

Au niveau des modèles quantitatifs, l'étude de Akinc (1993) proposait un support à la décision dans la sélection des fournisseurs en incluant la qualité. Le modèle avait pour objectif de maximiser les performances du niveau de conformité des produits reçus et de la performance des livraisons à travers l'utilisation des ratio de non conformité et de retard de livraison sur l'ensemble des produits. Ce modèle de programmation linéaire mixte spécifait le vecteur de fournisseurs minimisant les coûts et la quantité qui leur était attribué.

Pour leur part, Weber et al. (1993) ont fait l'utilisation de la programmation multiobjectif pour la sélection des fournisseurs dans un environnement manufacturier juste-à-temps. Leur méthode utilisait des indicateurs du coût des pièces, de la qualité des pièces et de leur délai de livraison. En variant le poids de chacun des critères, un vecteur d'alternatives concernant l'attribution des charges était généré en offrant un ensemble de meilleurs compromis. Mentionnons néanmoins que les deux dernières recherches

mentionnées avaient comme hypothèses d'effectuer une inspection à 100%, qui n'est pas en pratique si efficace à moins qu'elle soit automatisée.

Dans un contexte d'évaluation de la qualité par échantillonnage, les études réalisées par D'Amours et al. (1993) ont exposé une approche d'établissement des coûts de non-qualité à travers l'utilisation des plans d'échantillonnage par variables dans un environnement de sous-traitance. La méthode, dérivée du modèle de fonction de perte de Taguchi, a permis de déterminer le coût de non-qualité à imputer aux fournisseurs.

### **1.3.3 Constats**

La revue de littérature révélait qu'un nombre d'approches conceptuelles soulèvent l'importance d'évaluer la qualité dans la sélection des fournisseurs. De plus, un survol des recherches en logistique a démontré qu'il y a un manque à combler sur l'intégration simultanée des paramètres de la qualité, du transport et de la production.

Par ailleurs, l'inspection à la réception des matières ou des composants avant la production joue un rôle important dans les coûts d'exploitation. C'est pourquoi l'interaction du niveau de qualité des produits entre les étapes de fabrication a un effet significatif sur la qualité du produit final.

Donc, selon nous, une méthode adéquate de conception de réseau manufacturier intégrant l'évaluation de la qualité apporterait une amélioration à la situation actuelle. Dans la section suivante, nous proposerons une démarche conceptuelle considérant la qualité dans la conception d'un réseau.



#### 1.4 Démarche conceptuelle

Cette démarche est utilisée pour déterminer le choix des intervenants du réseau manufacturier. Trois outils seront utilisés séquentiellement pour concevoir le réseau. La figure 4 présente les liens entre les trois outils.

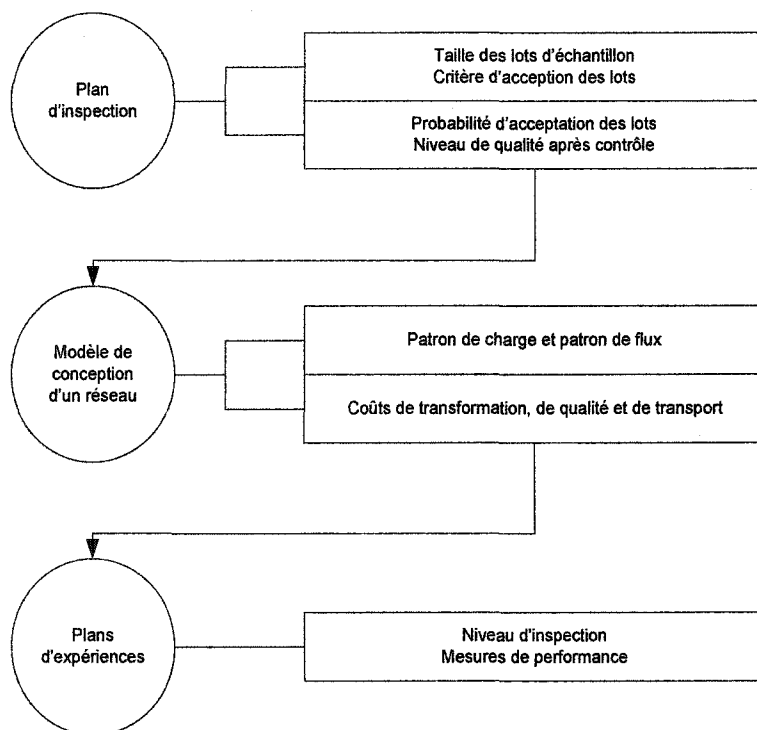


Figure 4 Lien entre les trois outils

En premier, l'évaluation des coûts de la qualité s'effectuera à travers les stratégies d'inspection de la qualité. Conséquemment, nous ajusterons les coûts d'inspection et de non-conformité des pièces non interceptées. Ces indexations seront développées dans les sections 3.5.2. et 3.5.3.

Ensuite, un modèle de programmation linéaire assignera une charge de travail à chacun des intervenants du réseau. Cette méthode de résolution permettra de concevoir une chaîne d'approvisionnement pour une demande bien spécifique. Nous utiliserons cette approche pour concevoir une chaîne d'approvisionnement en

considérant le facteur de la qualité des intrants pour appuyer le choix des sous-traitants. Ce processus est expliqué en détails dans la section 3.5.5.

Finalement, des expérimentations méthodiques (DOE) permettront d'établir la stratégie de contrôle qui permet de minimiser les coûts. Selon nos recherches, l'application de ce type de méthode de résolution incluant la qualité n'a pas été abordée et appliquée dans un système manufacturier en réseaux. La figure 5 illustre le flux de données dans le processus d'attribution des charges de travail. La prochaine section présentera nos hypothèses de travail.

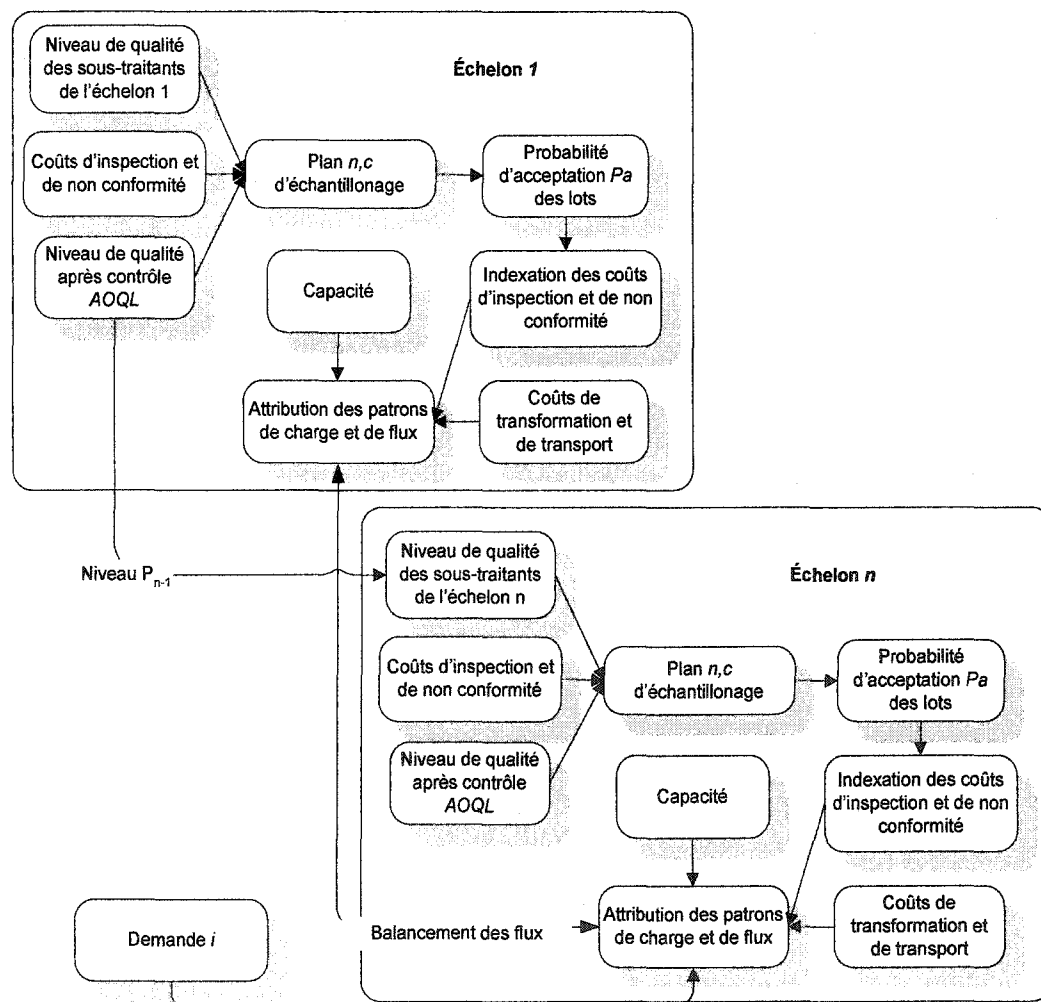


Figure 5 Flux de données du processus de l'attribution des charges

### 1.5 Hypothèses de travail

L'implantation et la validité de l'approche analytique présentée dans le chapitre 3 reposent sur certaines hypothèses de travail. Ces hypothèses sont présentées par la liste suivante :

- La demande représente une commande d'unités à un moment donné. Elle est considérée comme déterministe;
- La capacité de fournir des pièces ou composants, de transformer et de transporter est fixe;
- Le niveau de qualité des intervenants repose sur leur historique. Elle représente une moyenne pour chaque type de pièces et composants. Concernant les nouveaux soumissionnaires, elle représente un niveau de qualité certifiée ou imposée;
- L'ensemble des fournisseurs ou sous-traitants peut opérer leurs activités respectives sur l'ensemble des composants appartenant aux différents modèles de tableaux de bord;
- Le coût du transport est directement proportionnel à la distance entre les intervenants de la chaîne d'approvisionnement;
- L'ensemble des capacités du réseau satisfait à la demande;
- Indépendamment de la quantité attribuée à un fournisseur, les commandes sont livrées par lots de  $N$  unités;
- Les inspections sont réalisées sans erreur;
- Le coût de réparation des pièces inspectées et rejetées est assumée par le fournisseur.

### 1.6 Structure du mémoire

Le reste du mémoire est organisé comme suit. Au chapitre 2 nous présentons les différentes notions de bases des outils de modélisation et d'optimisation des systèmes manufacturiers. De plus, nous effectuerons un survol des développements liés aux

plans d'inspection et nous définirons divers coûts de la qualité. La revue des différentes techniques nous permettra de situer l'approche retenue pour la résolution de notre problématique.

Dans le troisième chapitre, nous adaptons un modèle de planification de réseau manufacturier flexible (Olivier, 1998) pour la planification stratégique d'un réseau manufacturier. Une analyse des coûts totaux de la qualité à travers les stratégies d'inspection pour chaque intervenant sera présentée. Pour minimiser ces coûts, on présentera trois scénarios d'inspection. Après coup, deux méthodes de résolution incluant les coûts de qualité seront proposées.

Le chapitre 4 présente un système manufacturier tiré d'un cas réel. Il s'agit de la fabrication et de l'assemblage de tableaux de bord pour automobile (Olivier, 1998). Suite à la présentation, nous résoudrons le système par programmation linéaire utilisant l'application Ilog OPL Studio.

Dans le cinquième chapitre, une modélisation empirique utilisant des plans d'expériences nous permettra de fixer les degrés d'inspection pour chacun des échelons du réseau. De plus, nous présenterons une analyse et interpréterons les résultats permettant de concevoir une chaîne d'approvisionnement en considérant l'aspect de la qualité.

## **1.7 Contributions de la recherche**

Cette recherche apporte une contribution dans la planification stratégique d'un réseau manufacturier en considérant l'évaluation de la qualité des intervenants. D'une part, notre approche se synthétise dans la validation quantitative du besoin et de l'économie d'évaluer l'effet de la qualité sur la conception d'un réseau et ce, par l'utilisation des plans de prélèvement économique et robuste à la variation de la qualité.

D'autre part, l'approche hybride de programmation mathématique et d'expérimentations méthodiques nous permettra de définir le choix des sous-traitants, la relation entre ces

derniers, la quantité d'unités qui leur sera respectivement attribuée et les stratégies de contrôle de la qualité en fonction des échelons du réseau. Il s'agit d'une contribution dans la littérature suite à un manque identifié à travers nos recherches.

## **1.8 Conclusion**

Dans une perspective théorique, une chaîne d'approvisionnement représente le flux qui transforme la matière première en produits finis pour rencontrer une demande. En réalité, la conception et le contrôle des chaînes d'approvisionnement sont beaucoup plus complexes. C'est pourquoi un des choix critiques est de déterminer qu'elles sont les relations, entre intervenants, les plus désirables pour réduire les coûts et augmenter les activités à valeur ajoutée de manière à faire des gains en compétitivité (Vollmann et al., 1998). Associé à l'utilisation croissante de la gestion intégrale de la qualité *TQM* et des concepts de juste à temps *JIT*, la sélection des fournisseurs est devenue extrêmement importante (Banker et Khosla, 1995). Dans ce contexte, nous avons établi la problématique de recherche qui est de concevoir une chaîne d'approvisionnement en minimisant des coûts d'opération (production et transport) et de qualité (inspection et non-conformité). Dans le chapitre suivant, nous présentons les outils de base de modélisation des réseaux, l'évolution des plans d'inspection et la définition des coûts de la qualité.

## **CHAPITRE 2**

### **CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT ET MODÉLISATION**

#### **2.1 Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre la nature des chaînes d'approvisionnement et ses différentes approches de modélisation. Ceci permettra de situer notre problématique de recherche et la méthode de résolution qui sera détaillée au cours du chapitre 3. Nous proposons d'abord de caractériser une chaîne d'approvisionnement pour ensuite présenter les différentes approches de modélisation fréquemment rencontrée en recherche opérationnelle et utilisée dans la résolution de problème en logistique. De plus, un survol des différentes recherches traitant des plans d'échantillonnage sera présenté, ce qui nous conduira à définir les coûts liés à la qualité.

#### **2.2 Définition, gestion et structure d'une chaîne d'approvisionnement**

Quoi que le terme soit relativement récent, les problématiques liées à la chaîne d'approvisionnement, ne le sont pas. C'est depuis peu que nous nous intéressons à la gestion des matières dans un ensemble intégré de fonctions comprenant toutes les activités allant de l'acquisition des matières premières jusqu'à l'expédition du produit au client final. Ainsi, le terme « gestion des chaînes d'approvisionnement » a émergé à la fin des années 80 et continu de prendre de l'intérêt dans la littérature. Voyons différentes définitions provenant de plusieurs auteurs.

D'abord, Nahmias (2001) caractérise une chaîne d'approvisionnement comme un réseau d'installations qui accomplit les tâches d'approvisionnement des matières premières, de transformation des intrants en produits finis et de distribution de ces produits vers les revendeurs ou directement aux clients. Ces installations, étant la propriété d'entreprises distinctes, sont des usines de transformation, des centres de distribution et des entrepôts de produits. Ainsi, une bonne gestion des chaînes

d'approvisionnement améliore l'efficacité des activités et augmente sa compétitivité par le partage de l'information et l'intégration de la planification. La figure 6 présente le processus d'une chaîne d'approvisionnement.

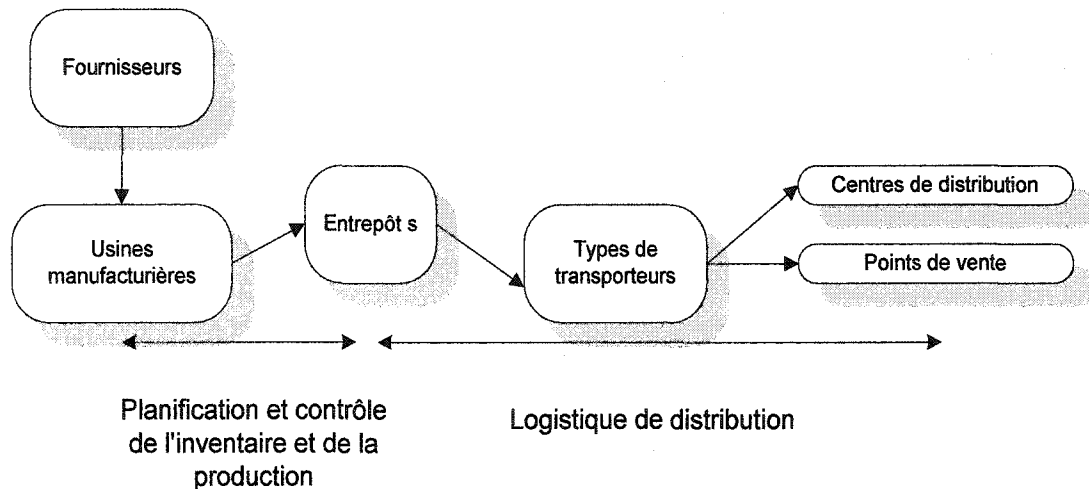


Figure 6 Processus d'une chaîne d'approvisionnement (Beamon et al., 2001)

Selon Simchi-Levi et al. (1999), la gestion des chaînes d'approvisionnement est défini comme un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, manufacturiers, entrepôts et magasins à l'intérieur desquels la marchandise est produite et distribuée de la bonne quantité, à la bonne installation, au bon moment pour minimiser le coût global du système tout en satisfaisant le niveau de service requis. La figure 7 présente une vue d'ensemble d'un système de production et de distribution.

Quant à Henkoff (1994), il ne fait pas de différence entre distribution, logistique ou gestion des chaînes d'approvisionnement. Il définit simplement ce procédé par lequel les entreprises acheminent du matériel, des composants et des produits aux clients de façon à développer des avantages compétitifs sur la qualité et les coûts.

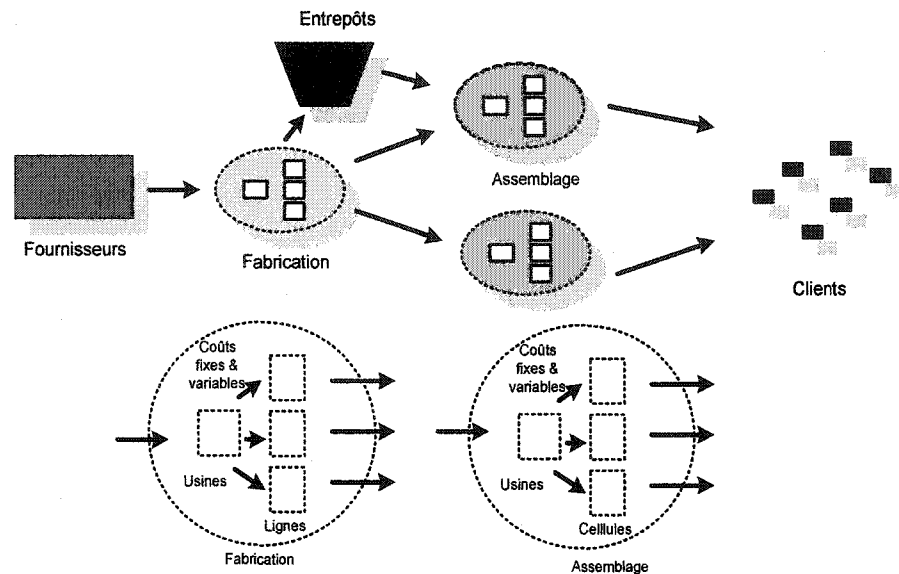


Figure 7 Vu d'ensemble d'une chaîne logistique (Simchi-Levi et al., 1999)

Conséquemment, l'ensemble des relations entre les entreprises définissent la structure d'une chaîne d'approvisionnement. De façon générique, une structure dite convergente lorsque l'ensemble des nœuds en amont converge vers un seul point. On retrouve un agencement de type divergent ou arborescent lorsque chaque nœud d'un réseau a au plus un prédécesseur. La troisième disposition, dite conjointe, est une combinaison de la structure divergente et convergente, joint par un seul nœud. Finalement, il existe le réseau de type général où la structure n'appartient pas à aucune des trois catégories précédentes (Beamon et al. 2001). La figure 8 illustre la classification des réseaux.

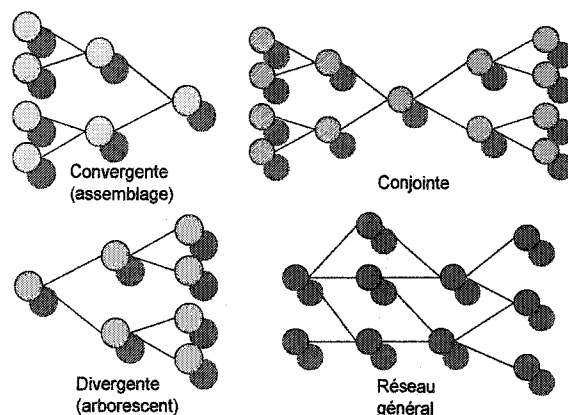


Figure 8 Types de structures des réseaux manufacturiers (Beamon et al. 2001)



### **2.3 Fonctions et défis de la logistique**

Les fonctions de la logistique sont représentées par les activités de planification, d'organisation et de contrôle des flux de matière première, produits en cours et produits finis, des points d'origine aux points de consommation. Dans ce sens, la logistique est l'art de s'assurer que les bons articles, les bonnes personnes et les bonnes informations soient disponibles à l'endroit et au moment voulus.

Les défis actuels en logistique sont caractérisés par des produits ayant des cycles de vie de plus en plus courts. Ces produits sont de plus en plus personnalisés pour des clients de plus en plus exigeants. Au niveau des entreprises, leur structure réduit leur intégration verticale et se focalise sur leurs compétences distinctives. Conséquemment, dans une économie de globalisation, la difficulté est d'élaborer une stratégie différente de celles des concurrents.

### **2.4 Définition général d'un modèle**

La résolution des problématiques en logistique fait souvent appel à l'utilisation de modèles. Les outils d'analyse et de décision en planification sont des modèles de prévision, des modèles statistiques d'analyse des coûts et d'utilisation des capacités, la simulation et l'optimisation par des méthodes exactes ou des méthodes heuristiques. Dans les entreprises, les modèles sont de plus en plus synonymes de planification au niveau exécutif (Gould et al., 1991). Cependant, aucun modèle ne peut garantir d'offrir la meilleure décision puisqu'il représente une approximation sélective et symbolique de la réalité. On présente à la figure 9 de la page suivante, l'interaction entre le modèle et les contraintes effectives.

Ainsi, un des aspects importants des modèles mathématiques sont les contraintes exprimées et intégrées au modèle. Elles représentent un ensemble de restrictions modélisées dans un problème bien particulier. Dans les sections qui suivent, il sera question des modèles de programmation mathématique, de simulation et de planification d'expériences.

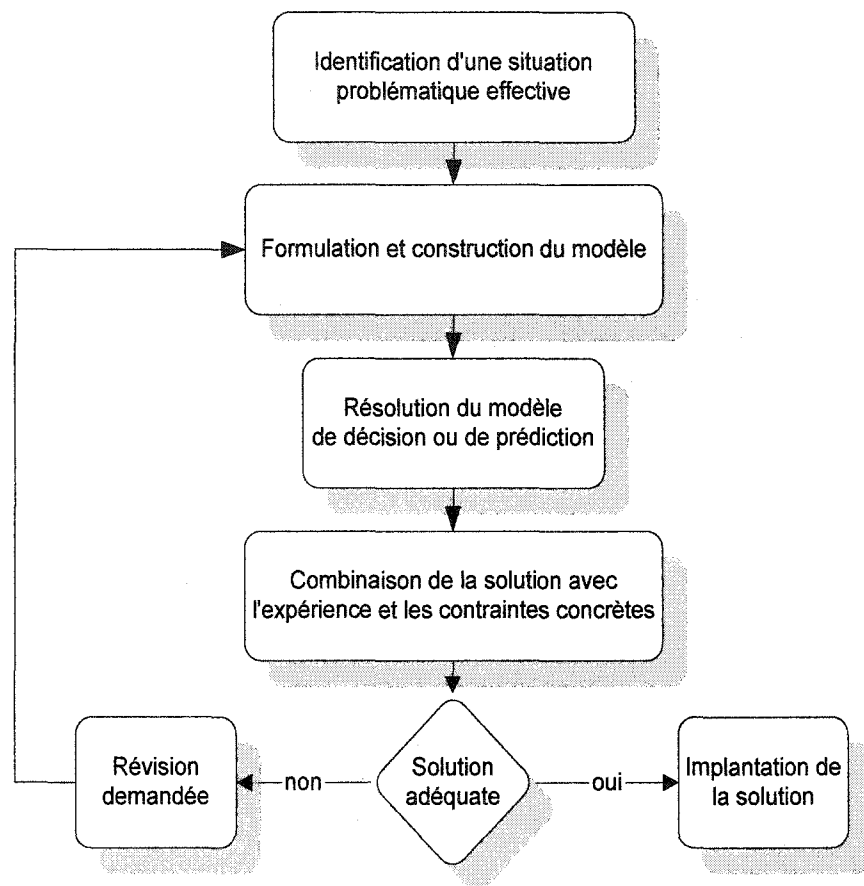


Figure 9 Interactions entre un modèle et ses contraintes effectives

## 2.5 Modèle mathématique

Douze différents types de modèles mathématiques utilisés dans l'environnement des problèmes décisionnels quantitatifs sont listés dans le tableau I. Quoique non exhaustive, la liste donne un aperçu de l'ensemble des techniques de résolution. On y retrouve dans la colonne de droite du tableau I le degré d'incertitude de l'approche. Certains sont des modèles déterministes (D) et d'autres probabilistes (P).

Tableau I

Modèles de décision par classe d'incertitude (Gould et al., 1991)

Type de modèle	Classification d'incertitude
Programmation linéaire	D
Réseau (Pert/CPM)	D,P
Inventaire, Planification, Ordonnancement	D,P
Économétrie, Prévion, Simulation	D,P
Programmation en nombres entiers	D
Programmation dynamique	D,P
Programmation stochastique	P
Programmation non linéaire	D
Théorie du jeu	P
Contrôle optimal	D,P
Fille d'attente	P
Équation différentielle	D

Plusieurs autres types de méthodes de modélisation existent. Pour notre part, nous fournirons une description des caractéristiques et des applications de la programmation stochastique, non linéaire, multiobjectif et linéaire.

### 2.5.1 Programmation stochastique

À partir d'études sur les procédés industriels, il est apparu que le caractère stochastique est présent dans la conception des réseaux manufacturiers. On retrouve ce phénomène dans la variabilité des délais d'approvisionnement (Artnzen et al., 1995), la fiabilité des fournisseurs (Vidal et al., 1996) et la fluctuation de la demande (Cohen et al., 1993) et du niveau de service (Pyke et al., 1993).

Lorsque le temps est un facteur influent dans le comportement du procédé, on se retrouve dans la situation où l'état probable d'une variable est en fonction du temps, les chaînes de Markov permettent de considérer ces aspects (Gershwin 2002). Utilisant les chaînes de Markov, Cohen et al. (1988) décompose une chaîne d'approvisionnement en

quatre sous-modèles représentant le contrôle d'inventaire, le contrôle de la production, la politique de commande et la détermination des lots économiques.

### 2.5.2 Programmation non linéaire

Un modèle de comportement non linéaire typique est sans doute la détermination du lot économique à fabriquer pour lequel les coûts d'inventaire représente une courbe convexe. Afin d'inclure ces coûts dans la conception de réseau, on a recours à la programmation non linéaire. L'émergence provient de Fritz John en 1948. La programmation non linéaire se définit dans sa forme symbolique par la maximisation ou la minimisation de  $f(x)$ , sujet aux contraintes :

$$\begin{aligned} g_j(x) &\leq 0 & j &= 1, 2, 3, \dots, m \\ h_i(x) &= 0 & i &= 1, 2, 3, \dots, p \\ x &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

Où les fonctions  $g_j(x)$  et  $h_i(x)$  du vecteur de variable  $x$  représentent les contraintes du modèle et la fonction-objectif est défini par  $f(x)$ . Les variable  $x$  font partie du domaine  $\mathbb{R}^n$ . À l'intérieur des différents algorithmes de résolution, mentionnons la méthode du gradient réduit généralisé GRG qui est de loin la plus populaire. La méthode des multiplicateurs de Lagrange est pour une fonction objectif soumise à des contraintes d'égalité. Ceci génère un système d'équations non linéaires qui est souvent difficile à résoudre. Il existe entre autres les techniques de minimisation séquentielle SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique) ou les méthodes primales. Néanmoins, plus le nombre de variables augmente, plus sa résolution devient rapidement complexe. Des méthodes numériques, les variables complexes et des transformées diverses deviennent nécessaires.

### 2.5.3 Programmation multiobjectifs

La notion d'optimisation d'un objectif prend place à la recherche d'un meilleur compromis lorsque plusieurs objectifs sont recherchés et parfois évoluant dans des sens opposés. On retrouve cette situation dans la sélection des fournisseurs où l'on considère des objectifs de minimisation des prix d'acquisition, de minimisation de la non conformité et de minimisation des délais d'approvisionnement (Weber et al., 1993). Dans sa forme symbolique, un problème peut être formulé comme :

$$\begin{aligned} & \text{Max} \{f_1(x) = z_1\} \\ & \text{Max} \{f_2(x) = z_2\} \\ & \quad \vdots \\ & \text{Max} \{f_k(x) = z_k\} \\ & \text{st} \quad x \in S \end{aligned}$$

Où  $x$  est un vecteur de variables de décision,  $f_n(x)$  sont des fonctions objectifs et  $S$  la région réalisable. La maximisation ou la minimisation de ces caractéristiques a pour but d'atteindre un niveau ciblé. Les variables de décision peuvent être continues ou discrètes et la fonction-objectif comme les contraintes, peu être linéaire ou non. Cette technique est appliquée dans des problèmes de localisation, d'allocation des ressources, de conception de réseaux et de systèmes de transport.

Au niveau de la conception des chaînes d'approvisionnement, Sabri (1998) a développé un modèle de planification stratégique et opérationnelle simultanée utilisant un modèle à plusieurs objectifs ayant des sous modèles non linéaires et utilisant des indicateurs de coûts, de niveau de service et des délais d'approvisionnement. Finalement, Zhou et al. (2000) utilisent des objectifs de minimisation de la consommation d'énergie et la maximisation des bénéfices d'un réseau manufacturier.

Pour notre part, notre objectif est unique, soit la minimisation des coûts globaux intégrant la qualité, le transport et la production.

### 2.5.4 Programmation linéaire

Le caractère singulier de la programmation linéaire réside dans la linéarité et la continuité. Concernant la fonction-objectif, elle est exprimée comme une fonction linéaire des variables de décision, tout comme ses contraintes (Hillier et al., 1990).

Une liste non exhaustive inclut la détermination des horaires d'employés, la planification et le contrôle de la production, des problèmes d'assignation, de localisation, de distribution ou de gestion de projet (Namhias 2001). Originellement, cette technique a été développée pour résoudre des problématiques de logistique pendant la deuxième guerre mondiale. La procédure de résolution appelée Simplexe, développé par George Dantzig en 1947, combinée au développement de l'informatique a établi la programmation linéaire comme étant un outil important dans la conception logistique. Nous nous référons à la section 1.3.1 des différentes applications spécifiques à la conception de réseau utilisant la programmation linéaire. Dans sa forme symbolique, un modèle d'optimisation contraint choisi des variables de décision qui maximise ou minimise la fonction  $C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$ , sujet aux contraintes :

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2, \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m, \\ x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0. \end{aligned}$$

Nous interprétons  $c_1, c_2, \dots, c_n$  comme étant des coefficients par unité sortant de l'activité  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,  $a_{ij}$  comme étant la quantité de ressource  $i$  consommée par une unité à l'activité  $j$  et  $b_i$  comme étant la quantité de ressource  $i$  disponible, pour  $i = 1, \dots, m$  et  $j = 1, \dots, n$ . Les constantes  $b_1, \dots, b_m$  doivent être positives. De plus, la région de solutions réalisable représente une structure dite polytonale convexe correspondante à l'ensemble des valeurs de  $x_1, x_2, \dots, x_n$  qui satisfont aux contraintes.

La quantité d'intervenants, le nombre de niveaux de fabrication et la structure arborescente du produit sont des éléments qui définissent la complexité d'un modèle.

Ainsi, dans ce contexte, la conception d'un réseau manufacturier est un problème qui comprend un vaste ensemble de variables. Il nous apparaît évident que la programmation linéaire représente la technique de résolution que nous allons privilégier.

## 2.6 Simulation

Pour différentes applications, des méthodes dites hybrides combinent la programmation mathématique à la simulation d'événements discrets. Pyke et al. (1993) ont développé un modèle de simulation permettant de valider la précision de la programmation stochastique.

Ainsi, la simulation par événements discrets est le procédé de modélisation logique d'un système réel pour effectuer des expérimentations, généralement sur support informatique. Ces expériences permettent d'en extraire des mesures de performance dynamique sans pour autant créer un réseau manufacturier réel ou en perturber un existant (Pritsker et al., 1999). La combinaison des valeurs de l'ensemble des variables de décisions représente un état donné et leurs manipulations simulent les différentes possibilités. Dans ce sens, des analyses de sensibilité donnent lieu à la description du comportement dynamique d'un système. Les étapes d'une étude de simulation sont illustrées à la figure 10.

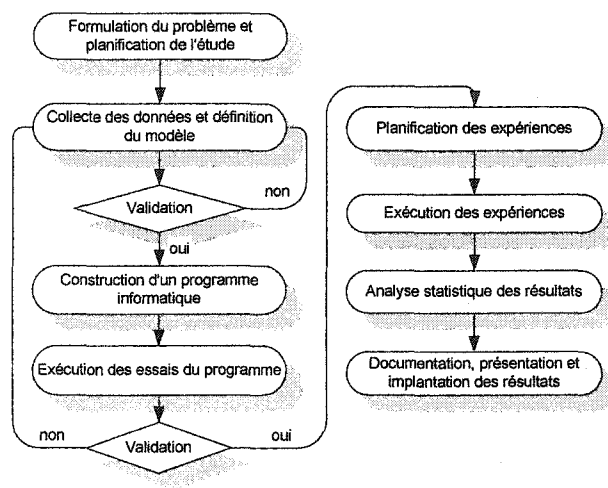


Figure 10 Étapes d'une étude de simulation (Pritsker et al., 1999)

En outre, quand l'objectif est d'analyser des décisions sous des conditions incertaines, la méthode Monte Carlo permet de représenter le comportement de certains facteurs avec des distributions de probabilité. Une simulation Monte Carlo utilise des nombres aléatoires distribués selon une distribution uniforme  $U(0,1)$ . Les nombres sont dits pseudo-aléatoires puisqu'ils sont générés à partir d'un algorithme récursif. Cette technique résout des problèmes de nature stochastique où le passage du temps n'a pas d'influence (Law et al., 1991). On retrouve également ce type de résolution dans certains problèmes statistiques qui n'ont pas de solution analytique. Par exemple, pour déterminer les valeurs critiques du test de normalité de *Kolmogorov-Smirnov*.

En somme, la simulation informatique fait partie de l'ensemble des outils à la disposition des concepteurs. Elle est souvent utilisée comme outil de conception ou d'aide à la prise de décision dans plusieurs entreprises.

## **2.7 Planification d'expériences**

La planification d'expériences a des applications dans les recherches de stratégie opérationnelle au niveau de la conception et du contrôle des systèmes de production. Gharbi et Kenne (1999) font l'utilisation d'optimisation empirique pour optimiser des lois de commandes du contrôle de la production. Ils ont consacré leurs efforts sur l'application d'une approche basée sur la simulation et la planification d'expérience pour optimiser les paramètres d'une loi de commande. Cette approche a permis de développer un plan de production et une stratégie de mise en cours dans un système sujet à des pannes aléatoires. Pour sa part, Rioux (2001) a élaboré une méthode de modélisation empirique des stocks intermédiaires dans un environnement en présence des pannes aléatoires.

Directement lié aux chaînes d'approvisionnement, Beamon et al. (2001) combinent la simulation et la planification d'expériences dans l'étude des effets de différents facteurs sur les performances d'une chaîne d'approvisionnement. Des expériences par simulation informatique furent réalisées sur des variables du système d'inventaire et



des données opérationnelles concernant la distribution de la demande, les délais d'approvisionnement et le taux de production.

En somme, la planification d'expériences fournit une configuration des essais pour obtenir l'information désirée avec le moins d'essais possibles. Elle est définie comme un exercice de développement d'un modèle théorique pour corréler un ensemble d'observations à travers la variation des facteurs d'un procédé. La figure 11 illustre une structure conceptuelle d'un système d'expérimentation.

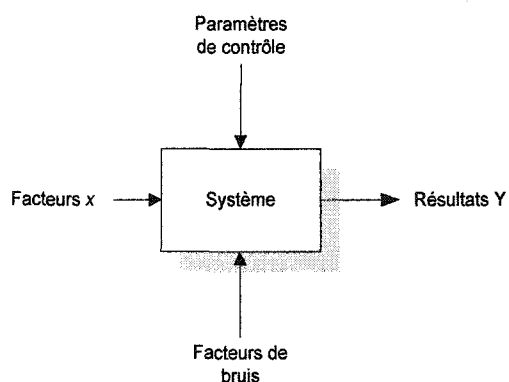


Figure 11 Structure conceptuelle d'un système

Les plans d'expérimentation proviennent originellement du statisticien anglais Ronald A. Fisher en 1930. Sa contribution était de démontrer qu'une structure factorielle complète pouvait être réduite de façon fractionnaire et rester statistiquement significative. Depuis, plusieurs développements eurent lieu par George E. P. Box et Genichi Taguchi, pour ne nommer qu'eux.

### 2.7.1 Comparaisons des plans d'expérimentations classiques et de Taguchi

On ne peut parler de planification d'expériences sans faire deux distinctions majeures. D'une part, les techniques dites classiques incluent la planification factorielle complète, factorielle fractionnaire, centrale composite et les surfaces de réponses. Ces méthodes sont statistiquement plus rigoureuses, incluant un plus grand nombre de tests

d'hypothèse et d'inférences statistiques. En outre, une plus grande emphase est portée sur la compréhension de la distribution des données et le calcul optimal des résultats par surface de réponse. Ces techniques sont plus appropriées pour la recherche et l'analyse statistique.

D'autre part, la méthode de Taguchi se concentre sur l'évaluation des effets principaux, plutôt que les interactions. On prend comme hypothèse qu'aucune distribution théorique n'ajuste exactement les données en considérant davantage l'approche de cause à effet. Les données sont ainsi plus rapidement collectées portant une plus grande attention sur la réplication des expériences. En somme, cette procédure est plus populaire dans le milieu industriel due à ses aspects pratiques et à la réduction du nombre d'essais.

### **2.7.2 Plans factoriels**

Les plans factoriels complets sont appropriés lors de l'étude de quelques facteurs à deux ou plusieurs niveaux. On y estime les effets principaux des différents facteurs et leurs interrelations. Par exemple, un plan factoriel  $2^k$  mesure deux niveaux pour chacun des facteurs  $k$ . Le nombre de combinaisons possible est exprimé par  $2^k$ .

Il est pertinent d'utiliser un plan factoriel fractionnaire lorsque le nombre de facteurs est élevé et lorsqu'il est peu pratique d'effectuer l'ensemble des combinaisons. Ces plans sont ainsi une fraction du plan factoriel complet, souvent associée à des plans à deux niveaux  $2^{k-p}$ . En contrepartie, un ensemble d'interactions devient confondu. Plus un plan est fractionné, plus la précision du modèle de prédiction est réduite.

D'autres plans existent, exigeant plus d'essais et permettant de quantifier les interactions quadratiques, tels que les plans factoriels à trois niveaux, les plans Box-Behnken et les plans Box-Wilson. Conséquemment, ces plans de surface de réponse ont l'avantage de modéliser des polynômes du deuxième degré. Les plans factoriel  $3^k$ , ressemblent au plan à deux niveaux, cependant il estime les coefficients des facteurs à partir de trois niveaux. Le nombre d'essais augmente rapidement avec l'ajout de

facteurs. Un plan  $3^2$  exige 9 essais, alors que l'ajout de deux facteurs supplémentaires nous donne un plan  $3^4$ , ce qui exigent 81 essais. Ces plans sont ainsi plus dispendieux.

Des innovations ont permis de réduire le nombre d'essais. Le plan Box-Benken (1960) est formé d'une combinaison de plan factoriel  $2^k$ , avec des blocks incomplets (Montgomery, 2001). Géométriquement, sa conception est de type sphéroïdale. Pour sa part, le plan Box Wilson permet d'évaluer les extrémités du domaine des facteurs. Il s'agit d'un ajout par rapport au plan factoriel, en ce sens qu'une étoile est ajoutée à l'intérieur du cube. Moyennant une distortion des points axiaux, on obtient un plan composite centré tronqué.

### 2.7.3 Analyse statistique

Dans une perspective statistique, la réalisation d'expérience a deux objectifs. Le premier étant celui d'établir les coefficients du modèle de régression donnant ainsi un poids à chacune des variables et le deuxième objectif étant d'estimer la précision du modèle de prédiction par l'erreur. (Wonnacott et al. 1995). Dans sa forme générale, le modèle est donné par l'équation 2.1 où  $Y$  est la réponse,  $x$  représente les facteurs,  $\beta$  sont les coefficients de régression et  $\varepsilon$  l'erreur du modèle.

$$Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_i \beta_i x_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.1)$$

On décompose l'analyse de la variance en trois types de coefficients. Le premier coefficient représente la variation totale générée par les expériences. Cette variation totale est composée de la variation exprimée par le modèle et celle exprimée par l'erreur des différentes répliques. Pour notre part, l'utilisation de ces techniques d'expérimentation et d'analyse statistique nous permettrait de déterminer les paramètres des plans d'inspection associés aux échelons du réseau. En effet, le produit prend de la valeur à travers le système de production, modifiant ainsi ses coûts d'inspection et de non-conformité.

## **2.8 Techniques d'échantillonnage**

Dans plusieurs situations, on ne pourra pas utiliser un contrôle à 100%. C'est vrai lorsque le contrôle est destructif, lorsque les frais de contrôle sont élevés ou lorsque le contrôle exhaustif n'est pas physiquement réalisable pour tous les lots sans entraîner une relâche très marquée des contrôleurs au cours de l'inspection. À cause de ces restrictions, il devient nécessaire d'effectuer le contrôle à l'aide d'un plan d'échantillonnage. Ce plan représente une modalité de prélèvement spécifique dont le but premier est de fournir des règles permettant de prendre une décision d'acceptation ou de rejet d'un lot. Les différents plans d'échantillonnage utilisés dans l'entreprise sont habituellement des plans simples ou doubles. Ils existent également des plans multiples ou progressifs qui due à leur complexité sont très rarement utilisés. Nous référons à Baillargeon (1995) pour la description exhaustive de ces types de plans. Il existe également des plans triples et des plans d'échantillonnage continu.

### **2.8.1 Normes d'échantillonnage pour contrôle par attributs**

Des standards militaires définissant le type de plan d'échantillonnage applicable dans des situations particulières furent élaborées. Les tables *MIL STD 105E*, qui furent remplacé par les normes ANSI/ASQ Z1.4, sont sans doute les tables les plus couramment utilisées dans les entreprises pour la mise en œuvre d'un système d'échantillonnage. Elles ont été élaborées au cours de la deuxième guerre mondiale pour les besoins de l'armée et de la marine américaine. Ces standards se présentent selon trois modalités, soit un contrôle normal, renforcé ou réduit. Le mode effectué sur les premiers lots d'une série est normal. Suivant les résultats obtenus, le mode de contrôle suivant devient sévère ou réduit. La norme Z1.4 et la norme NFX 06-022 définit les règles pour la modification du mode de sévérité du contrôle (Schilling, 1982).

### 2.8.1.1 Plan d'inspection sans défaut

Du point de vue statistique, les plans d'échantillonnage ne peuvent pas garantir le niveau de qualité. C'est pourquoi dans l'optique de garantir un haut niveau de qualité, une méthode fut basée sur l'acceptation de lot ayant zéro défaut. Cependant, avec cette méthode, la responsabilité d'identifier et de corriger les mauvais lots de pièces est transférée au fournisseur, ce qui se caractérise par un risque de se voir refuser un lot de qualité acceptable (Juran et al., 2001). Il s'ensuit que plusieurs revendications face aux plans sans défaut furent identifiées.

Afin de vérifier les revendications envers les plans d'inspection sans défaut et dans le but de quantifier un niveau de protection contre les défauts, une courbe d'efficacité fut développée. Par conséquent, chaque plan d'échantillonnage se caractérise par une courbe d'efficacité *OC (Operating Characteristic)* qui trace la probabilité d'acceptation d'un lot en fonction du niveau de la qualité des intrants.

Pour plusieurs situations impliquant des tests coûteux ou destructifs, il est de pratique commune d'utiliser un plan d'inspection simple avec un échantillon de petite taille et de ne permettre aucune non conformité pour l'acceptation du lot (Raju, 1989). En effet, la présence d'une non-conformité entraîne le rejet du lot. Cependant la courbe d'efficacité a une forme particulièrement pénalisante en ce sens que la probabilité d'acceptation diminue rapidement avec des niveaux bas de non-conformité.

## 2.9 Coût de la qualité

Un des aspects importants de notre sujet de recherche correspond à la réduction des coûts de la qualité par la sélection des stratégies d'inspection les plus économiques. De façon générale, parmi les coûts de la qualité, on retrouve des pièces mises au rebut à cause du matériel défectueux acheté. Par conséquent, des coûts de défaillance internes sont engendrés par de la manipulation additionnelle, du stockage de produit de remplacement ou des actions correctives. Ces coûts sont causés par des arrêts de

machines, des mises au point non prévue, des réparations de machines et une replanification de la production. Chez les sous traitants, les conséquences sont d'augmenter les coûts d'exploitation et incidemment le prix de vente. On présente dans le tableau II les différents types de coûts par catégorie. De plus, en annexe I, on présente un lexique des coûts de la qualité.

Tableau II

Coût de la qualité du produit chez le client (Youssef, 1995)

Catégorie	Type de coût
Rejet du produit par le client	Remplacement du produit Dépenses en administration Transport Pénalités Retard de paiement Impacts sur l'état financier (marge de crédit, intérêts)
Remplacement ou réparation	Pièces de rechange Main d'œuvre directe Transport Administration du service après-vente Système de traitement des données Campagne de correction
Intangible	Perte d'une commande, de clients ou d'un marché Impacts négatifs sur la réputation de l'entreprise Perte de confiance du client

## 2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni une vue d'ensemble de l'utilité des modèles quantitatifs pour la prise de décision. Nous avons discuté du rôle des modèles dans le processus en mettant en relief la notion d'optimisation d'un point de vue mathématique. En effet, les modèles sont des représentations limitées de la réalité et les hypothèses simplificatrices permettent de contraindre les modèles.

À l'intérieur de l'ensemble des modèles, nous avons survolé la programmation mathématique, la simulation et la planification d'expériences. De plus, nous avons couvert les méthodes d'évaluation de la qualité. Les plans d'échantillonnage sont des techniques permettant d'évaluer la qualité des pièces, composants et produits finis. L'utilisation de ces méthodes dans la conception d'un réseau manufacturier nous permettrait d'évaluer les coûts de la non qualité en relation avec le niveau fourni par les différents fournisseurs et sous-traitants potentiels.

Dans le prochain chapitre, nous allons développer une structure de conception de réseaux impliquant des paramètres de coûts de qualité. Nous proposerons la combinaison de la programmation linéaire, des plans d'échantillonnage et des plans d'expériences pour effectuer une optimisation empirique qui nous mènera à une solution qui minimise l'ensemble des coûts.

## **CHAPITRE 3**

### **FORMULATION DU PROBLÈME ET APPROCHE DE RÉOLUTION**

#### **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons le problème de conception d'un réseau manufacturier assujéti par des contraintes de qualité présentent chez les différents intervenants de la chaîne. Ce choix se justifie puisque l'amélioration de la qualité des fournisseurs devient un centre d'intérêt majeur (Garneau et Youssef, 1995). De ce fait, un grand nombre d'activités inhérentes aux chaînes d'approvisionnement dépendent de la qualité des intrants d'un système de production. Pour notre part, ce problème réside dans la détermination d'un patron de flux et d'un patron de charge pour un système manufacturier tout en minimisant les coûts d'opération constitués des coûts unitaires de transformation et de transport en plus des coûts de la qualité comportant des coûts d'inspection et de non-conformité. Rappelons que le système est constitué de plusieurs sous-traitants, répartis sur plusieurs étapes de production et fabriquant un ensemble de produits possédant différents routages.

Le but de ce chapitre est d'adapter le modèle développé par Olivier (1998) en incluant les coûts de la qualité de chacun des intervenants. Ce modèle évalue déjà des coûts de transformation et de transport. Nous désirons y ajouter des coûts variables du contrôle et de la non-qualité. Pour évaluer ces coûts, les méthodes utilisées dans ce chapitre sont basées sur les techniques d'échantillonnage. Par la suite, nous ferons la jonction de l'évaluation des coûts de la qualité, émergeant de la théorie des probabilités, et des coûts linéaires des opérations.

Le reste du chapitre est organisé comme suit. Nous traiterons de la variation des intrants sur le niveau moyen de la qualité après contrôle dans la section 3.2. Dans la section 3.3, nous explorons la minimisation du nombre moyen d'inspection. Dans la section 3.4, nous présenterons les plans d'inspection économiques et robustes, c'est à



dire insensible à la variation de la qualité. Après quoi, nous définirons sous formes d'équations les coûts de la qualité, qui seront intégré au modèle d'Olivier (1998) dans la section 3.5. Finalement, dans la section 3.6, nous adapterons l'approche développée à la section 3.5 en faisant l'utilisation des plans d'échantillonnage double.

### 3.2 Effet de la variation du niveau de la qualité

Le niveau de la qualité a une influence sur le résultat d'un plan d'inspection qui se traduit sur le niveau moyen de la qualité après contrôle, AOQ (*Average Outgoing Quality*). Afin d'illustrer ce constat, prenons l'exemple du niveau de la qualité d'un processeur se situant à 1.75%. Lorsque l'exigence du client se définit par un niveau de qualité acceptable AQL (*Acceptable Quality Level*) de 0.5%, différentes combinaisons de plans ( $n$ ,  $c$ ) permettent de se conformer à la spécification du client. Cependant, lorsque pour une même combinaison le niveau de qualité varie, le niveau de qualité après contrôle varie également. La figure 12 illustre ce constat.

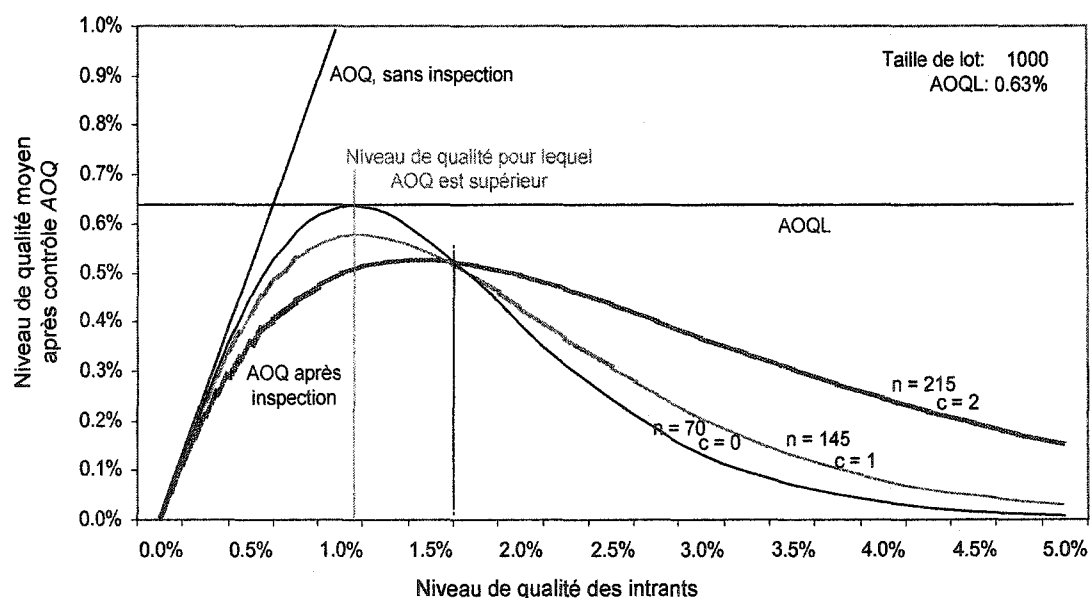


Figure 12 Variation de niveau AOQ en fonction de  $p$  (Dodge Romig, 1959)

Les trois plans présentés dans la figure précédente offrent le même niveau de la qualité après contrôle lorsque le niveau de la qualité des intrants est de 1.5%. Cependant, une variation à la baisse de la qualité rend le plan  $n: 215$  et  $c: 2$  plus efficace, avec un niveau AOQ plus bas que les deux autres plans. Conséquemment, l'indicateur du niveau des extrants robuste à la variation de la qualité est le niveau de la qualité limite après contrôle AOQL (*Average Outgoing Quality Level*). Il s'agit de cet indicateur que nous utiliserons pour atténuer la variation du niveau de la qualité des fournisseurs à chacune d'une étape de fabrication.

### 3.3 Minimisation du nombre moyen d'inspections

Pour une même protection caractérisée par l'AOQL ou par le pourcentage de non-conformité acceptée LTPD (*Lot Tolerance Percentage Defect*), il existe plusieurs plans ayant différentes combinaisons de la taille d'échantillon  $n$  et du critère d'acceptation  $c$ . Le tableau III présente un exemple de différents plans pour un lot de 800 pièces ayant 1% de non-conformités et un niveau LTPD de 5%. Parmi ces derniers, le plan le plus économique est de taille  $n=134$  avec un critère d'acceptation de  $c=3$ . Nous entendons ainsi faire l'utilisation des plans qui minimisent le nombre moyen d'inspections.

Tableau III

Plans d'échantillonnage simple assurant un LTPD de 5% (*Baillargeons, 1995*)

Taille d'échantillon $n$	Critère d'acceptation $c$	Probabilité d'acceptation d'un lot $P_a$	Risque du fournisseur $1-P_a$	Nombre moyen de d'inspection $I$
46	0	63.13%	36.87%	324
78	1	85.19%	14.81%	184.9
107	2	90.63%	9.37%	171.93
134	3	95.28%	4.72%	165.4
160	4	97.63%	2.37%	175.2
186	5	98.80%	1.20%	193.4
211	6	99.40%	0.60%	214.5
236	7	99.70%	0.30%	237.7
260	8	99.90%	0.10%	260.5
285	9	99.90%	0.10%	285.5
309	10	100.00%	0.00%	309

### 3.4 Choix d'un plan robuste et économique

Les plans d'échantillonnages développés par Dodge et Romig, publiés pour la première fois au début des années 40 dans le «*Bell System technical Journal*», sont conçus pour établir un système de contrôle, lot par lot, avec contrôle à 100% des lots non acceptés et rectification des items défectueux. Nous employons cette procédure lorsque les délais, les volumes de production et le type de pièce rendent le retour des lots rejetés au fournisseur ou la mise au rebut peu rentable. Il s'agit en général de pièces présentant une certaine valeur, faciles à inspecter et dont le transport est coûteux (Beauchamp, 1995).

Le contrôle s'effectue par attributs et suppose qu'il est non destructif de sorte qu'il soit possible si un lot n'est pas accepté, d'en effectuer un contrôle exhaustif à 100%. La figure 13 présente le processus d'inspection avec rectification. Les unités soumises doivent provenir d'une source commune et peuvent être des composants d'un produit, des assemblages partiels ou encore des produits finis.

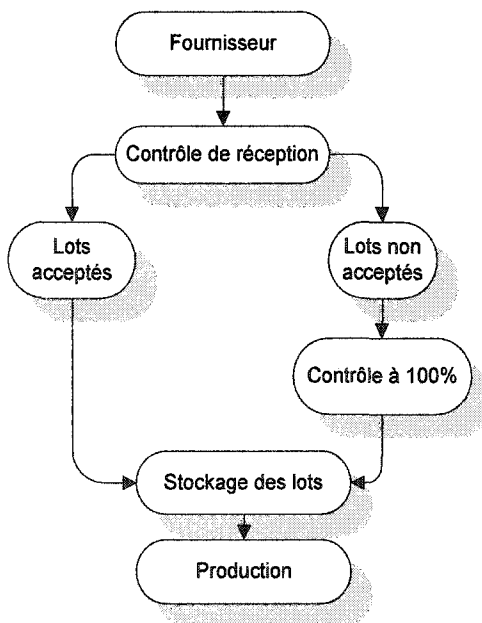


Figure 13 Processus d'inspection rectifiant (Dodge Romig, 1959)

En sommes, les objectifs de ces plans sont de fournir au client une protection bien spécifique caractérisée par des *AOQL* ou *LTPD* et d'obtenir des plans d'échantillonnage qui, tout en respectant le premier objectif, minimisent la quantité moyenne contrôlée à long terme.

### 3.4.1 Notations

Les notations présentées au tableau IV seront employées pour la conception des plans économiques et la définition des coûts de la qualité présentée dans la section 3.4.2.

Tableau IV

#### Notation des plans d'échantillon

– $N$	: Quantité d'items dans un lot
– $P$	: Risque du consommateur
– $P_a$	: Probabilité d'acceptation d'un lot
– $p_t$	: Niveau de qualité toléré dans un lot
– $p$	: Niveau de qualité moyen du produit soumis
– $c$	: Critère d'acceptation d'un lot
– $n$	: Taille de l'échantillon
– $l$	: Nombre moyen d'inspection par lot
– $M = p_t N$	: Nombre de non-conformité dans un lot de niveau $p_t$
– $a = p_t n$	: Nombre de non-conformité dans un échantillon ayant $p_t$
– $z = p_l l$	: Produit de $p_t$ et du nombre d'inspection
– $k = p/p_t$	: Ratio du niveau de qualité moyen de $p_t$
– $m$	: Nombre de non-conformités trouvées dans un échantillon
– $C_n^N = \frac{N!}{(N-n)!n!}$	: Quantité de combinaison de $N$ items liés à $n$ à la fois

### 3.4.2 Relations mathématiques

Les plans de Dodge Romig (1959) sont conçus de façon à trouver des valeurs de  $c$  et  $a$  qui minimise  $z$ , sujet aux conditions qui satisfont à l'équation 3.1. Par conséquent, dû à la discontinuité de  $c$ , les paires  $(c, a)$  sont soumises à l'équation 3.2 jusqu'à l'obtention d'une valeur minimum de  $z$ .

$$P = f_2(M, a, c) = \sum_{m=0}^{m=c} C_m^M \left(1 - \frac{a}{M}\right)^{M-m} \left(\frac{a}{M}\right)^m \quad (3.1)$$

$$z = f_1(M, a, c, k) = M - (M - a) \sum_{m=0}^{m=c} \frac{(ka)^m e^{-ka}}{m!} \quad (3.2)$$

### 3.5 Modèle de conception d'un réseau

Maintenant que la méthode d'évaluation de la qualité est sélectionnée, nous verrons une façon de l'implanter dans un processus de conception de chaîne d'approvisionnement. Dans cette section, nous présentons le modèle utilisé pour effectuer la conception d'un réseau logistique. L'objectif du modèle mathématique est de minimiser les coûts totaux d'opérations constitués des coûts unitaires de transformation, de transport, d'inspection et de non-conformité en générant des patrons de flux et de charge qui évaluent les paramètres des intervenants d'une chaîne d'approvisionnement. Typiquement, le modèle considère la demande pour chaque produit, la capacité et la qualité des processeurs et l'équilibrage de flux entre ces derniers.

Le reste de cette section présentera le phénomène d'interaction du niveau de la qualité entre les échelons et les équations qui nous permettra de quantifier les coûts de la qualité. Après quoi, nous définirons le modèle mathématique de conception de réseau et la procédure de résolution. Finalement, une deuxième méthode d'évaluation de la qualité sera développée, utilisant pour sa part, des plans d'échantillonnage doubles.

### 3.5.1 Interaction du niveau de qualité entre les échelons

L'interaction de la qualité entre les niveaux représente une contrainte supplémentaire dans la conception d'un système manufacturier à plusieurs étapes. Le niveau de qualité sortant d'une étape influencera le niveau de qualité de l'étape suivante. Nous représentons le degré de qualité entre les niveaux par la probabilité conjointe du niveau de conformité des intrants et du processeur sur lequel est effectuée la transformation. L'équation 3.3 représente cette situation. Il s'ensuit que le degré de protection du plan d'échantillonnage influencera le niveau de qualité des étapes en aval.

$$P(E_1 \cup E_2 \dots \cup E_n) = \sum_i P(E_i) \sum_{i < j} P(E_i E_j) + \sum_{i < j < k} P(E_i E_j E_k) \\ \sum_{i < j < k < l} P(E_i E_j E_k E_l) + \dots + (-1)^{n+1} P(E_1 E_2 E_3 E_4) \quad (3.3)$$

Où  $E_1$  représente le niveau de la qualité des processeurs et  $E_2$  jusqu'à  $E_n$  représente le niveau de la qualité après contrôle des intrants au processeur  $E_1$ . Quant à la répercussion sur les coûts d'inspection  $C^I$  et de non-conformité  $C^D$ , la figure 14 présente les relations qui déterminent les coûts  $C^I$  et  $C^D$ .

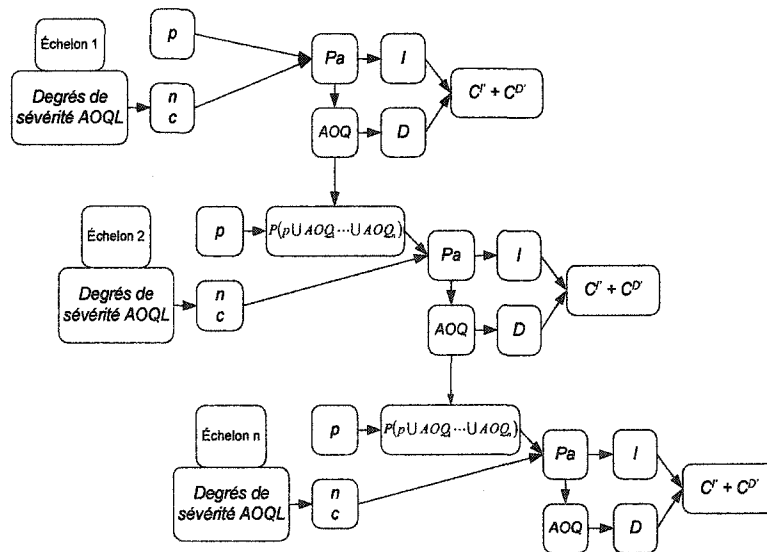


Figure 14 Relations déterminantes des coûts  $C^I$  et  $C^D$

Le niveau de la qualité des produits est spécifié à l'intérieur de la soumission ou déterminé par l'historique du fournisseur ou du sous-traitant. Cet élément permet de définir le design opérationnel d'un plan d'échantillonnage. Ce design est caractérisé par une courbe d'efficacité OC représentant la probabilité d'acceptation  $P_a$  d'un lot en fonction du niveau de qualité  $p$  (Besterfield, 2001). En somme, toutes les informations sont disponibles pour obtenir le niveau de la qualité après contrôle AOQ, le nombre moyen d'inspections  $I$  et le nombre moyen de non-conformités  $D$ .

### 3.5.2 Indexation du coût moyen d'inspection

Les paramètres du niveau de qualité des intrants et de protection du plan d'inspection nous permettent d'obtenir la valeur du nombre moyen d'inspections unitaire  $I$  provenant d'un plan simple. Cette valeur s'exprime par les fonctions 3.4 et 3.5.

$$I = N(1 - Pa) + Pa * n \quad (3.4)$$

$$Pa = \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} \quad (3.5)$$

$P_a$  et  $n$  sont déterminés à partir du plan d'inspection choisi. Rappelons que notre hypothèse de départ indiquait que les charges attribuées divisées par lot de 1000 unités, conséquemment le coefficient  $P_a * n$  est réparti sur 1000. Il reste à ajouter le coût d'inspection, formulé par l'équation 3.6.

$$c' = c * \left( 1 - \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} + \frac{n * \left( \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} \right)}{1000} \right) \quad (3.6)$$

Où  $c' = c * I/N$

### 3.5.3 Indexation du coût moyen de non-conformité

Le nombre de pièces non conforme n'ayant pas été interceptées est déterminé par les fonctions 3.7 et 3.8.

$$D = N * (AOQ) \quad (3.7)$$

$$D = N * \left( \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} * p \left( 1 - \frac{n}{N} \right) \right) \quad (3.8)$$

Où  $D$  représente le nombre d'unités défectueuses non interceptées. L'équation 3.9 modélise l'ajout du coût de non-qualité répartie sur l'ensemble des unités d'un lot de 1000.

$$c^{D'} = c^D * \left( \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} \right) * p \left( 1 - \frac{n}{1000} \right) \quad (3.9)$$

Où  $c^{D'} = c^D * D / N$ .

Notons que plus la pièce prend de la valeur dans le processus de fabrication, plus son coût de non-conformité augmentera, ce qui aura une influence sur la détermination des stratégies d'inspection adoptées ultérieurement.

### 3.5.4 Notations

Les notations présentées au tableau V seront employées dans la formulation du modèle mathématique de conception d'un réseau du tableau VI.



Tableau V

## Notation du modèle de conception

**Indices**

- $i$  : Un item à être traité par le réseau  
 $m, n, n'$  : Sous-traitant du réseau  
 $s$  : État actuel d'un item donné

**Variables**

- $F_{isnn'}$  : Flux des items  $i$ , possédant l'état  $s$ , circulant des sous-traitants  $n$  à  $n'$   
 $Q_{isn}$  : Quantité d'items  $i$  à traiter au sous-traitant  $n$  pour les amener à l'état  $s$   
 $R_{isn}$  : Quantité d'items  $i$ , possédant l'état  $s$ , reçue par le sous-traitant  $n$  provenant d'une source extérieure  
 $S_{isn}$  : Quantité d'items  $i$ , possédant l'état  $s$ , expédiés du sous-traitant  $n$ , pour satisfaire une demande externe

**Paramètres de coûts**

- $c_{isn}^{D'}$  : Coût indexé d'un item  $i$  non conforme, possédant l'état  $s$ , du sous-traitant  $n$   
 $c_{isnn'}^F$  : Coût de circulation d'un item  $i$ , possédant l'état  $s$ , entre les sous-traitants  $n$ ,  $n'$   
 $c_{isn}^{I'}$  : Coût indexé d'inspection d'un item  $i$ , possédant l'état  $s$ , au sous-traitant  $n$   
 $c_{isn}^Q$  : Coût de traitement d'un item  $i$  au sous-traitant  $n$  pour l'amener à l'état  $s$   
 $c_{isn}^R$  : Coût d'approvisionnement d'un item  $i$ , possédant l'état  $s$ , provenant du sous-traitant  $n$   
 $c_{isn}^S$  : Coût d'un item  $i$ , possédant l'état  $s$ , expédier par le sous-traitant  $n$  pour satisfaire la demande

**Autres paramètres**

- $as_n$  : Capacité de production unitaire des sous-traitants  $n$   
 $bs_{nn'}$  : Capacité de transport unitaire entre les sous-traitants  $n$  et  $n'$   
 $q_{isi's'n}$  : Quantité d'items  $i$ , possédant l'état  $s$ , requis pour fabriquer un item  $i'$ , par le sous-traitant  $n$   
 $r_{is}$  : Demande externe globale pour un item  $i$  possédant l'état  $s$

Tableau VI

## Modèle mathématique de conception d'un réseau

**Objectif : Minimisation des coûts**

$$\begin{aligned}
& \sum_{\forall isnn'} c_{isnn'}^F F_{isnn'} + \sum_{\forall isn} (c_{isn}^Q Q_{isn} + c_{isn}^R R_{isn} + c_{isn}^S S_{isn}) + \sum_{\forall isn} (c_{isn}'^Q Q_{isn} + c_{isn}'^R R_{isn} + c_{isn}'^S S_{isn}) \\
& + \sum_{\forall isn} (c_{isn}^{D'} Q_{isn} + c_{isn}^{D'} R_{isn} + c_{isn}^{D'} S_{isn}) \quad (3.1)
\end{aligned}$$

0)

**Sujet aux contraintes suivantes :**

1- Rencontre des demandes externes

$$\sum_{\forall n} S_{isn} = r_{is} \quad \forall i, s \quad (3.11)$$

2- Balancement des flux entrant aux processeurs

$$R_{isn} + \sum_{\forall n} F_{isnn'} = \sum_{\forall i's'} q_{isi's'n} Q_{i's'n'} \quad \forall i, s, n, n' \quad (3.12)$$

3- Équilibrage des flux sortant des processeurs

$$Q_{isn} = S_{isn} + \sum_{\forall n} F_{isnn'} \quad \forall i, s, n, n' \quad (3.13)$$

4- Capacités planifiées des intrants

$$Q_{in}, R_{in}, S_{in} \leq as_{in} \quad \forall i, n \quad (3.14)$$

5- Capacités planifiées de transport

$$F_{inn'} \leq bs_{inn'} \quad \forall i, n, n' \quad (3.15)$$

6- Non-négativité des intrants, des encours et du transport

$$\forall F_{inn'} \geq 0, \forall Q_{in} \geq 0, \forall R_{in} \geq 0 \quad (3.16)$$

### 3.5.5 Description des équations

La fonction-objectif du modèle, l'équation (3.10), du tableau VI vise à minimiser les coûts. Le premier élément a pour objectif de quantifier le coût des flux entre les différents sous-traitants du réseau. L'élément suivant veille à déterminer les coûts liés à l'attribution des charges aux sous-traitants. On y combine les coûts d'approvisionnement des composants, les coûts de transformation des items semi-finis et des produits finis sortants. La troisième élément comptabilise les coûts d'inspection et le dernier élément calcul le coût de non-conformité.

On utilise les contraintes pour effectuer l'équilibrage de la circulation des items entre les sous-traitants ainsi que du respect de leur capacité. La première contrainte, l'équation (3.11) force la production des différents items finis en associant la demande externe à la somme des variables de sortie de tous les sous-traitants pouvant produire cet item en fonction d'un état désiré.

Les contraintes deux et trois assurent l'équilibrage des flux entre les différents sous-traitants. L'équation (3.12) comptabilise les flux entrant à chacun des sous-traitants en tenant compte de la structure de l'item, c'est-à-dire des composants nécessaires pour sa production ainsi que de la quantité requise. L'équation (3.13) s'occupe des flux sortant de chacun des sous-traitants. Les quantités à produire pour chaque item sont liées aux flux en circulation entre les sous-traitants.

Les contrainte quatre et cinq qui correspondent aux équations (3.14) et (3.15) traitent la limite de capacité des sous-traitants et du transport. L'utilisation totale est limitée par la capacité dans ces deux équations.

Enfin, la contrainte six définie par l'équation (3.16) contient les contraintes de non-négativité des variables des intrants, des encours et du transport, ce qui complète le modèle permettant de déterminer les patrons de flux et de charge de travail qui minimisent les coûts dans un réseau.

### 3.5.6 Approche de résolutions

La figure 15 illustre les étapes de résolution de l'approche proposée dans laquelle nous faisons l'utilisation des plans d'échantillon simple.

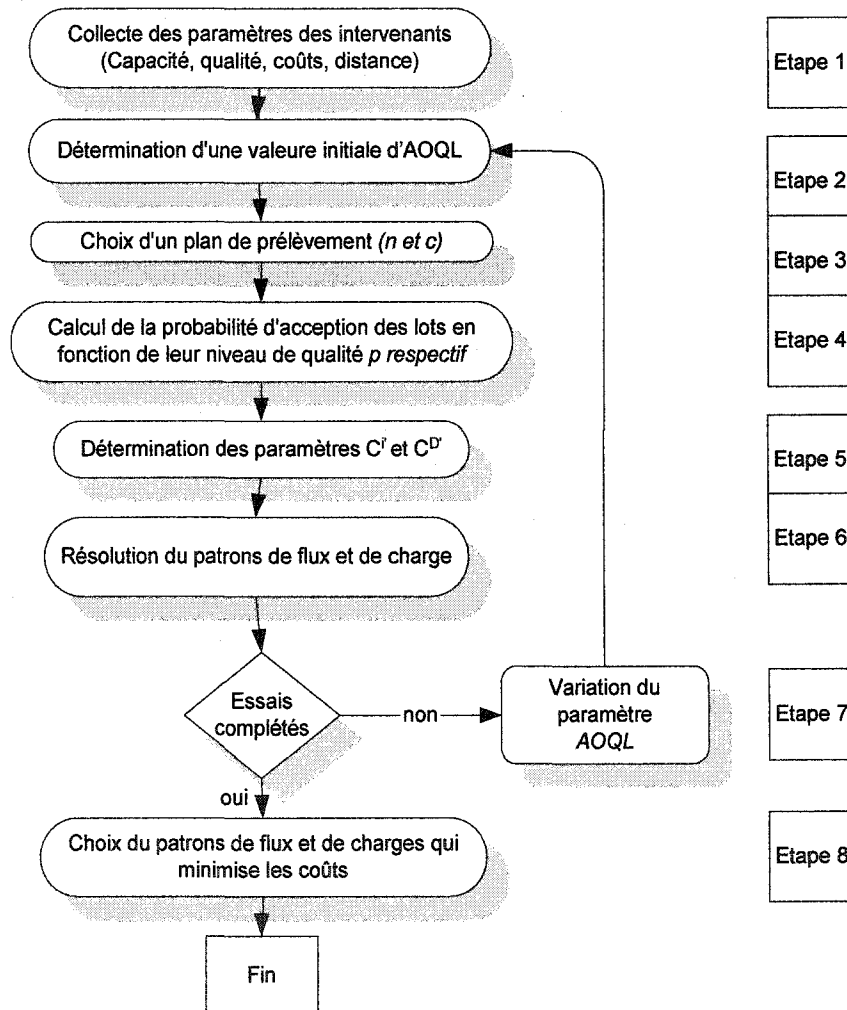


Figure 15 Étapes de résolution

Nous présentons dans la prochaine section une approche de résolution avec l'utilisation des plans d'échantillon double. Dans le chapitre suivant, nous présenterons un cas d'application et l'implantation de l'approche de résolution.

### 3.6 Plan d'inspection double

L'avantage du plan double par rapport au plan simple est qu'en moyenne, le nombre de pièces contrôlées est moindre (Baillargeon, 1995) pour la même efficacité du plan d'inspection. Par ailleurs, il existe des plans d'inspection double économiques qui déterminent les combinaisons des tailles d'échantillon  $n_1$ ,  $n_2$  et des critères d'acceptations  $c_1$ ,  $c_2$  qui minimisent le nombre moyen de pièces à inspecter. Ils considèrent le niveau de qualité limite tolérée par lot *LTPD* ou le niveau de qualité limite après contrôle *AOQL*.

#### 3.6.1 Paramètres d'évaluation de la qualité

En fixant un plan d'échantillonnage, nous obtenons certaines valeurs de l'équation 3.17 qui évalue le nombre moyen de pièces à inspecter  $I$ .

$$I = n_1 * P_1 + (n_1 + n_2) * P_2 + Q * (1 - P_a) \quad (3.17)$$

Le plan d'échantillonnage nous donne la taille du premier échantillon  $n_1$  et le critère d'acceptation  $c_1$ , la taille du deuxième échantillon  $n_2$  et le critère d'acceptation  $c_2$ . Ces valeurs évaluent la probabilité d'accepter le premier échantillon  $P_1$ , la probabilité d'accepter le deuxième échantillon  $P_2$  et la probabilité d'accepter le lot effectif  $P_a$ . Les équations suivantes définissent ces différentes probabilités.

$$P_1 = P(d_1 \leq c_1 | n_1, p) \quad (3.18)$$

$$P_2 = \sum_{k=c_1+1}^{k=c_2} P(d_1 = k | n_1, p) * P(d_2 \leq c_2 | k, n_2, p) \quad (3.19)$$

$$P_a = P(d_1 \leq c_1 | n_1, p) + \sum_{k=c_1+1}^{k=c_2} P(d_1 = k | n_1, p) * P(d_2 \leq c_2 | k, n_2, p) \quad (3.20)$$

À partir de ces formules de calcul de probabilité d'acceptation, nous utilisons les formules 3.6 et 3.9 pour calculer les coûts d'inspection  $c''$  et de non-conformités  $c^{D'}$  utilisés dans le modèle mathématique.

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons formulé sous forme d'équations le coût moyen unitaire d'inspection, le coût moyen unitaire de non-conformité et le programme mathématique de conception de réseau. De façon à évaluer la qualité des intervenants, nous pouvons faire l'utilisation des plans d'inspection simple ou double. Dans le chapitre suivant nous présentons l'application du modèle avec un cas d'assemblage de tableaux de bord.

## **CHAPITRE 4**

### **APPLICATION DU MODÈLE DE PLANIFICATION**

#### **4.1 Introduction**

Dans ce chapitre, on présente l'application du modèle de programmation linéaire adaptée pour considérer la qualité lors de la conception d'un réseau manufacturier de tableaux de bord. Dans un premier temps, nous définirons la gamme de fabrication du produit. Ensuite, nous définirons les coûts et les paramètres de l'ensemble des intervenants. Avec l'aide d'un langage de programmation, nous déterminerons le patron de flux et de charge qui minimise ces coûts. La section 4.2 présente la définition du produit. La section 4.3 expose la structure du modèle de programmation mathématique. On présente à la section 4.4 les résultats du modèle d'optimisation du réseau. Ces résultats seront représentés sous forme de réseaux manufacturiers virtuels à la section 4.5. Finalement, la section 4.6 présente l'interaction du niveau de qualité entre les étapes de production et l'interprétation de l'influence de la qualité sur les résultats.

#### **4.2 Définition du produit**

Le cas étudié consiste en la conception d'un réseau qui assemble des tableaux de bord pour automobile (Olivier, 1998). Le système manufacturier est composé d'un ensemble de sous traitants séparés par différentes distances. Un ensemble de configurations est possible en fonction de la demande, des limites de capacité des intervenants, des produits et de leur nomenclature. L'arrangement des étapes de la production est réparti en quatre niveaux. Dans le premier niveau, on retrouve des fournisseurs de bobines *B* et des composants *AS* et *AT*. Les pièces *B* sont acheminées vers le deuxième niveau où chacun des composants *BS* et *BT* sont sous-traités. L'ensemble des pièces est acheminé vers le troisième niveau où se présentent les sous-traitants qui assemblent les indicateurs de vitesse *S*, les tachymètres *T* et les indicateurs généraux *G* de l'essence et de la pression d'huile. Finalement, le montage final est réalisé par les

sous-traitants de type C. La gamme de fabrication de l'ensemble des produits est illustrée à la figure 16.

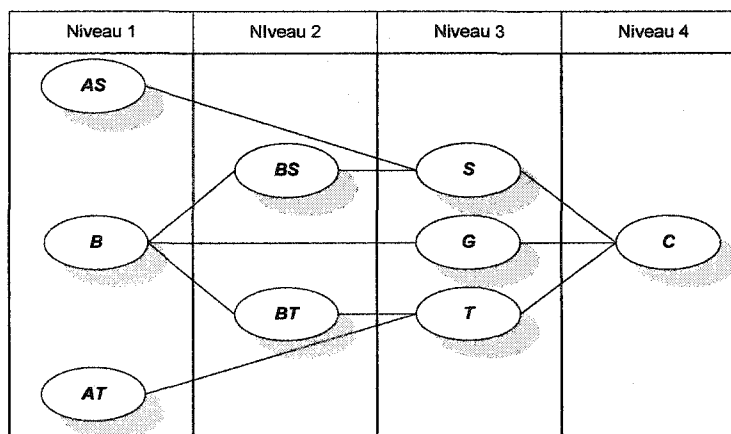


Figure 16 Gamme de fabrication des tableaux de bord

Chacun des modèles de tableau de bord possède sa propre nomenclature. Le tableau VII présente la composition des 6 types de produits.

Tableau VII

Nomenclature de pièces des tableaux de bord

Composition	Produit					
	A	B	C	D	E	F
G	2	1	2	1	1	2
T	1	1	1	-	1	-
S	-	-	1	1	1	1

Par exemple, la structure du produit C comprend deux cadrans généraux, un indicateur de vitesses et un tachymètre. Sa nomenclature arborescente est illustrée à la figure 17 où les composants BS et BT sont des sous assemblages SA, les composants G, S, T sont des assemblages A et le tableau de bord C est le produit fini. Le nombre de pièces requises est inscrit au dessus de chacun des niveaux.



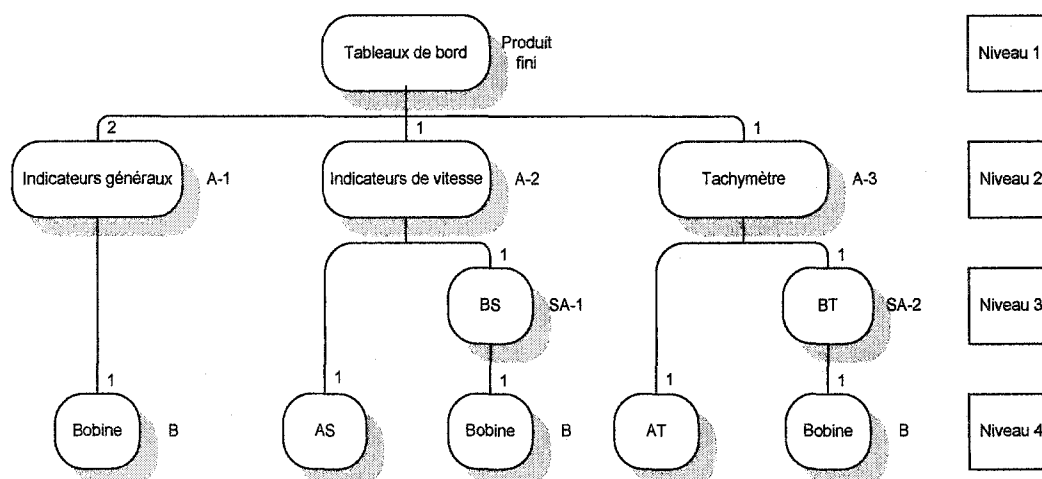


Figure 17 Nomenclature du tableau de bord de type C

Par conséquent, les composants changent d'état au cours des opérations effectuées chez chacun des sous-traitants. Les états du produit passeront de composants à sous-assemblages et finalement à produit fini. On présente au tableau VIII, les spécifications génériques du procédé incluant l'ensemble des états par lesquels passeront les produits.

Tableau VIII

## Spécification générique du procédé des fournisseurs

INTRANTS			EXTRANTS			FOURNISSEURS	
PRODUIT	ÉTATS	QUANTITÉ MOYENNE	PRODUIT	ÉTATS	QUANTITÉ MOYENNE	IDENTIFICATION	COÛT MOYEN DE PRODUCTION(\$)
G	Complété	1.78	C	Fini	1	C1 À C6	23.63
S	Complété	0.74					
T	Complété	0.62					
B	Compantes	1	G	Sous-assemblage	1	G1 à G5	10.35
AS	Composant	1	S	Sous-assemblage	1	S1 à S5	20.69
BS	Complété						
AT	Composant	1	T	Sous-assemblage	1	T1 à T4	22.45
BT	Complété	1					
B	Composant	1	BS	Sous-assemblage	1	BS1	2.35
B	Composant	1	BT	Sous-assemblage	1	BT1	2.05
			AS	Composant	1	AS1 et AS2	9.9
			AT	Composant	1	AT1 et AT2	11.9
			B	Composant	1	B1 à B6	6.73

Ainsi, on peut lire dans le tableau les états de chacun des composants entrant chez les fournisseurs et la quantité moyenne requise de chacune des composants pour l'ensemble des 6 produits. Par exemple, à la sortie des sous-traitants de type S, des indicateurs de vitesse assemblés seront disponibles. Pour effectuer les opérations par ces fournisseurs, les intrants requis sont un appliqué AS et une bobine BS. La même démarche est applicable à l'ensemble des composants des différents produits. On lit dans la dernière colonne du tableau les différents fournisseurs avec lesquels le produit peut être transformé et le coût moyen d'opération. Ces fournisseurs ont la flexibilité de fabriquer les composants respectifs pour l'ensemble des produits.

#### 4.3 Construction du modèle

Le modèle de planification de la production du réseau manufacturier a été adapté du modèle de Hurtubise (2001) avec le langage de programmation Ilog Opl Studio version 3.6. Deux fichiers distincts composent le modèle. Le premier inclut les équations de la fonction-objectif et des contraintes décrites à la section 3.5.5. Les paramètres du coût de transport entre intervenant potentiel, du coût d'opération, du coût d'inspection et de non-conformité sont énumérés. De plus, on y désigne le nombre de sous-traitants à chacun des nœuds, les différents produits et la nomenclature de chacun des produits tels qu'énuméré au tableau VII. Les valeurs de ces paramètres sont déclarées dans le deuxième fichier. Conséquemment, le logiciel lit les équations définies sous forme de boucles du premier fichier et récupère les données du deuxième fichier en fonction des scénarios étudiés.

La problématique d'intégrer l'évaluation de la qualité par échantillonnage requiert la définition des coûts d'évaluation et de non-conformité. Pour ce faire, la définition de paramètre du niveau de qualité limite après contrôle déterminera la sévérité de l'inspection et aura une incidence sur les coûts de qualité. Comme premier test, nous définissons arbitrairement un AOQL de 1% pour chacun des intervenants. Ce paramètre définit un plan d'inspection ayant une taille d'échantillonnage de 120 unités et un critère d'acceptation de 2 unités pour des lots de 1000 unités (Dodge Romig, 1969). En nous référant à la section 3.5.2 et 3.5.2, nous indexons les coûts d'inspection

et de non-conformité en fonction de la sévérité du plan d'échantillonnage choisi pour chacun des niveaux de qualité des intervenants

#### **4.4 Résultat du modèle de planification du réseau**

Le choix de sous-traitants, de leurs charges respectives et du niveau des flux circulant entre eux est dicté par les résultats du modèle d'optimisation. Ce dernier minimise les coûts pour l'ensemble des produits. Le patron de charge et de flux établi est dédié aux 6 types de produits et leurs gammes de fabrication respectives. Le tableau IX indique le patron de charge de chacun des fournisseurs, en précisant chacune des pièces à transformer. Par exemple, le sous-traitant C3 effectue 4000 assemblages du produit final. Ce nombre est déterminé en fonction de la nomenclature qui spécifie 2 indicateurs *G*, un indicateur *S* et un tachymètre *T* pour une demande totale de 5000 unités.

Au niveau du patron de flux, les composants *G*, *S* et *T* seront acheminées vers les fournisseurs *C*. La quantité de chacun de ces composants vers un sous-traitant spécifique est illustrée au tableau X. Pour simplifier l'information générée, seul le flux agrégé des 6 produits est présenté. En combinant l'information contenue dans les patrons de charge et celles des patrons de flux, il est facile de désagréger ces flux pour chaque produit.

De ce fait, le fournisseur *G1* est alimenté par les fournisseurs *B1* et *B2*. Les valeurs désagrégées du patron de charge nous renseignent sur les flux entre les fournisseurs pour le produit *B*. Nous déduisons que 2000 composants sont acheminées de *B1* à *G1* et que 1000 composants proviennent de *B2*. La même déduction peut être utilisée pour toutes les autres relations entre fournisseurs pour remplir la demande des produits.

Tableau IX

Planification des charges de production, AOQL de 1%

CHARGE		FOURNISSEUR	
TABLEAU	AS1	AS2	Total
C	5000		5000
D		7000	7000
E	500	2500	3000
F	2500	2500	5000
Total	8000	12000	20000

CHARGE		FOURNISSEUR	
TABLEAU	AT1	AT2	Total
A		1000	1000
B		3000	3000
C	5000		5000
E	2000	1000	3000
Total	7000	5000	12000

CHARGE		FOURNISSEUR					
TABLEAU	B1	B2	B3	B4	B5	B6	Total
A			2000	1000			3000
B	3000			3000			6000
C	4000		1000	9000		6000	20000
D	1000	7000			6000		14000
E	2000			7000			9000
F		2000		10000	1000	2000	15000
Total	10000	9000	3000	30000	7000	8000	67000

CHARGE		FOURNISSEUR	
TABLEAU	BS	Total	
C	5000	5000	
D	7000	7000	
E	3000	3000	
F	5000	5000	
Total	20000	20000	

CHARGE		FOURNISSEUR	
TABLEAU	BT	Total	
A	1000	1000	
B	3000	3000	
C	5000	5000	
E	3000	3000	
Total	12000	12000	

Tableau IX (suite)

CHARGE		FOURNISSEUR				
TABLEAU	C1	C2	C3	C5	C6	Total
A				1000		1000
B	2000	1000				3000
C				2000	3000	5000
D	7000					7000
E			2500	500		3000
F		1000	1500	2500		5000
Total	9000	2000	4000	6000	3000	24000

CHARGE		FOURNISSEUR				Total
TABLEAU	G1	G2	G3		G5	Total
A			2000			2000
B	3000					3000
C			4000		6000	10000
D	7000					7000
E		1000	2000			3000
F	2000		5000		3000	10000
Total	12000	1000	13000		9000	35000

CHARGE		FOURNISSEUR				
TABLEAU	S1	S2	S3	S4	S5	Total
C				3000	2000	5000
D	5000	2000				7000
E			2500	500		3000
F		1000	1500	2500		5000
Total	5000	3000	4000	6000	2000	20000

CHARGE		FOURNISSEUR				Total
TABLEAU			T3			Total
A			1000			1000
B			3000			3000
C			5000			5000
E			3000			3000
Total			12000			12000

Tableau X

Planification des flux avec un AOQL de 1%

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À					Total
DE		C1	C2	C3	C5	C6	
G1		9000	3000				12000
G2				1000			1000
G3				1500	11500		13000
G5				3000		6000	9000
Total		9000	3000	5500	11500	6000	35000

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À					Total
DE		C1	C2	C3	C5	C6	
S1		5000					5000
S2		2000	1000				3000
S3				4000			4000
S4					5000	1000	6000
S5						2000	2000
Total		7000	1000	4000	5000	3000	20000

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À					Total
DE		C1	C2	C3	C5	C6	
T3		2000	1000	2500	3500	3000	12000
Total		2000	1000	2500	3500	3000	12000

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À					Total
DE		S1	S2	S3	S4	S5	
AS1					6000	2000	8000
AS2		5000	3000	4000			12000
Total		5000	3000	4000	6000	2000	20000

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À					Total
DE		S1	S2	S3	S4	S5	
BS		5000	3000	4000	6000	2000	20000
Total		5000	3000	4000	6000	2000	20000

Tableau X (suite)

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À
DE	T3	Total
AT1	7000	7000
AT2	5000	5000
<b>Total</b>	<b>12000</b>	<b>12000</b>

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À
DE	T3	Total
BT	12000	12000
<b>Total</b>	<b>12000</b>	<b>12000</b>

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À
DE	BT	Total
B4	12000	12000
<b>Total</b>	<b>12000</b>	<b>12000</b>

FLUX ENTRE FOURNISSEUR		À
DE	BS	Total
B1	6000	6000
B3	1000	1000
B4	7000	7000
B5	6000	6000
<b>Total</b>	<b>20000</b>	<b>20000</b>

#### 4.5 Résultats présentés par réseaux manufacturiers virtuels

Les résultats présentés à la section précédente sont plutôt complexe à visualiser pour obtenir une vision globale des activités de chacun des nœuds et du niveau de transit entre ces derniers. L'information contenue est spécifique à un fournisseur pour l'ensemble de la demande agrégée. Une représentation plus globale permet de mieux visualiser ces patrons de charges et de flux. Conséquemment, la représentation par réseaux manufacturiers virtuels *VMN* (Olivier, 1998) s'avère une approche plus conviviale. Ces réseaux présentent, pour chaque produit, l'ensemble des fournisseurs utilisés et le niveau de flux circulant entre eux. La figure 18 présente une légende des

informations contenues dans les réseaux manufacturiers virtuels. Un réseau par produit est présenté, basé sur les données synthétisées des tableaux IX et X. Mentionnons que la structure de réseau est de type général, c'est-à-dire qui n'appartient à aucune des trois catégories présentées à la section 2.2.

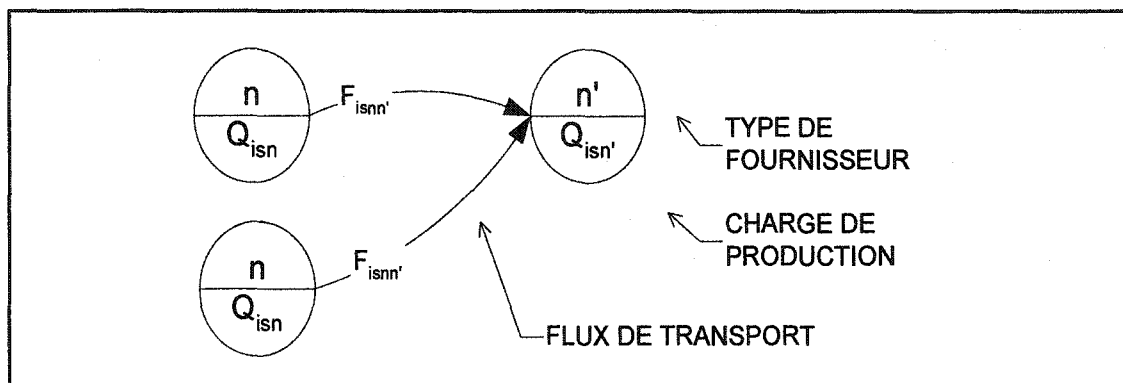


Figure 18 Légende du réseau manufacturier virtuel VMN

À l'intérieur de ces réseaux, les nœuds représentent les sous traitants et les arcs établissent le flux circulant dans le réseau. Les nœuds sont identifiés par un numéro d'identification.

Le premier réseau représente le produit A, illustré par la figure 19. La demande de ce produit est de 1000 unités. Il est composé de deux indicateurs généraux G et d'un compte-tours T. Pour sa réalisation le sous-traitant T3 est alimenté par les sous-traitants BT1, AT2 et B4. Les sous-traitants G1 et G3 sont respectivement alimentés par les fournisseur B2 et B3. La dernière étape de fabrication revient au fournisseur de type C2. Le même raisonnement est utilisé pour les produits B, C, D, E et F illustrés par les figures 19 à 24.



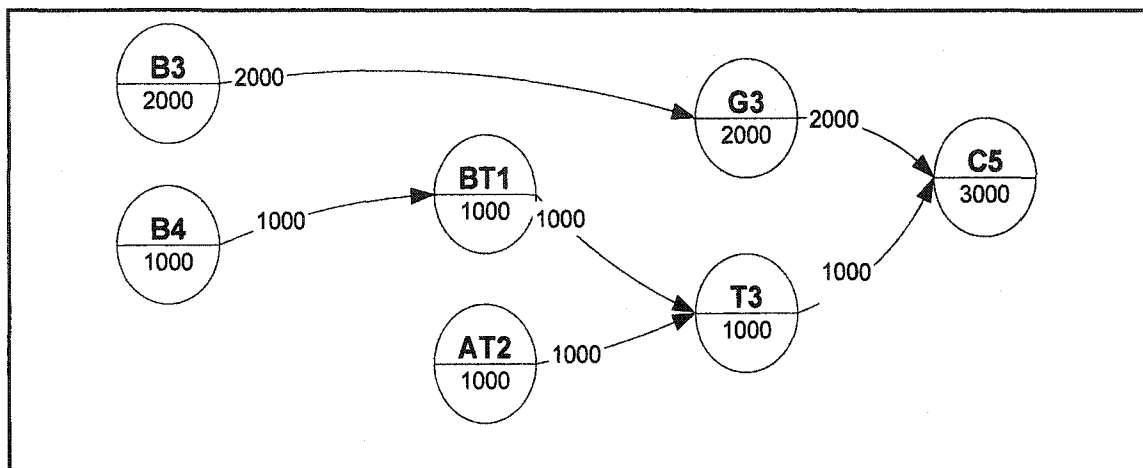


Figure 19 VMN du produit A

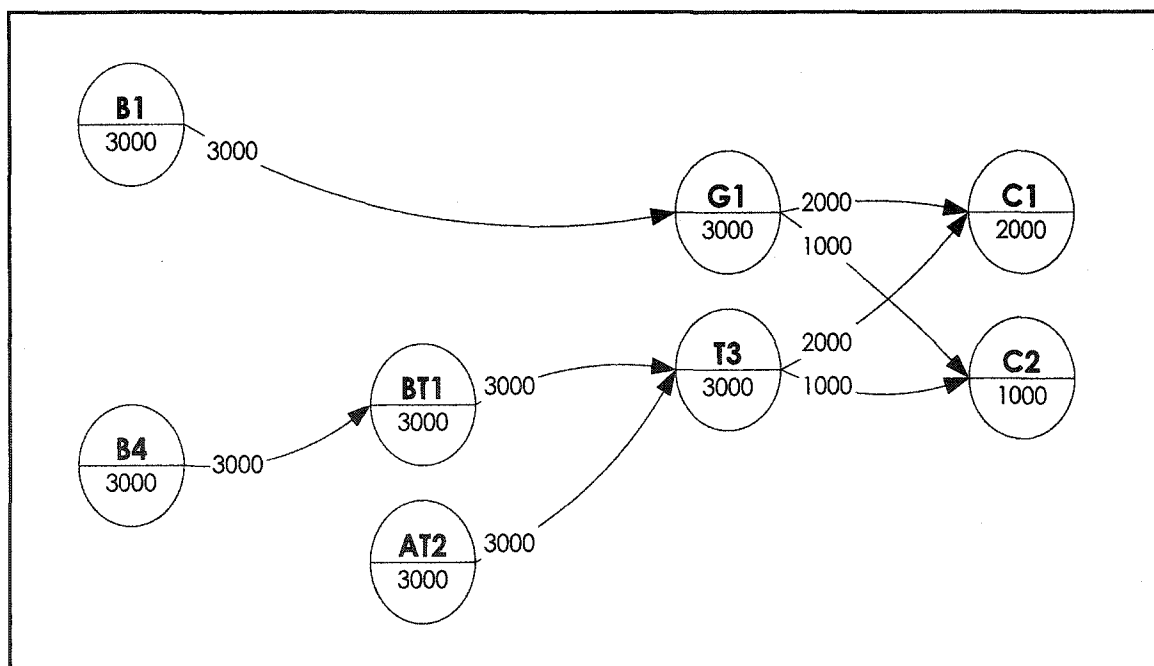


Figure 20 VMN du produit B

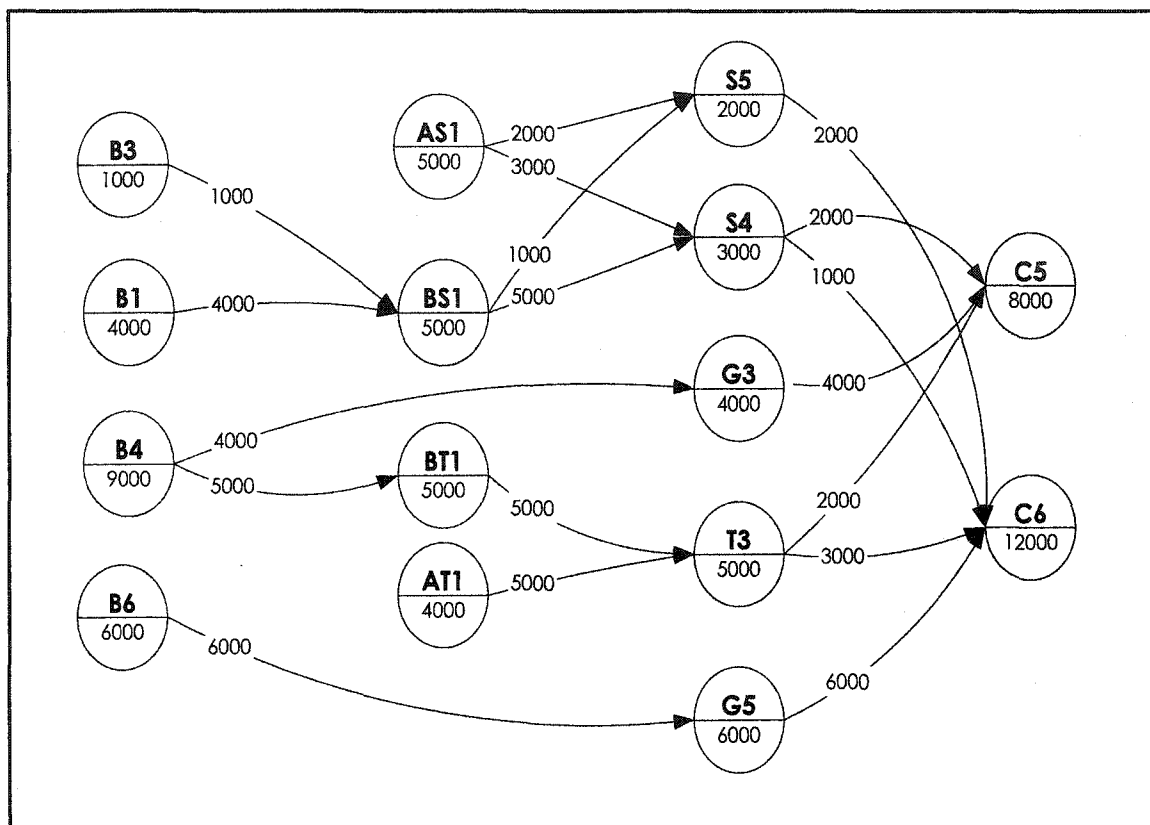


Figure 21 VMN du produit C

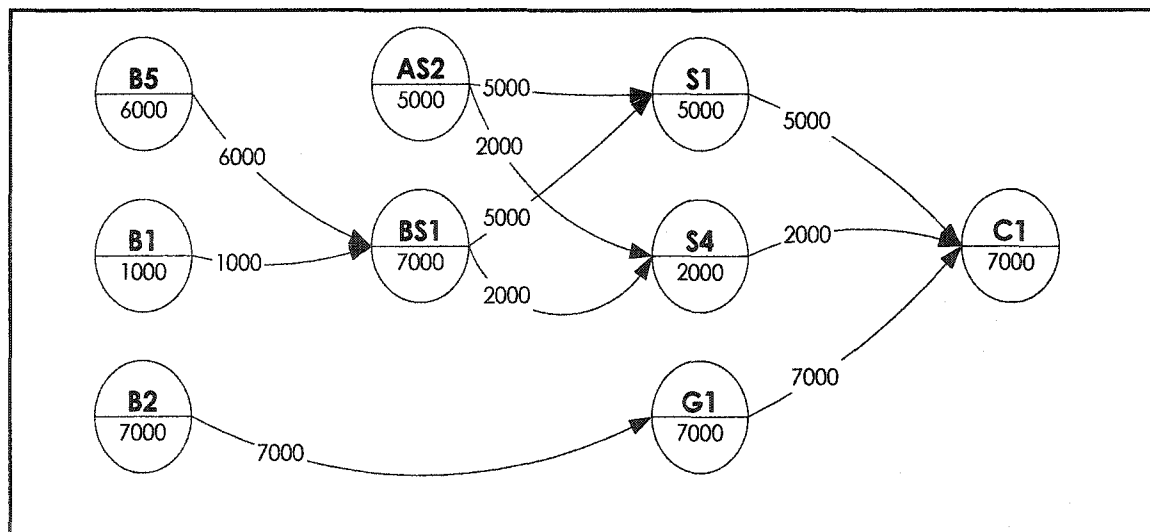


Figure 22 VMN du produit D

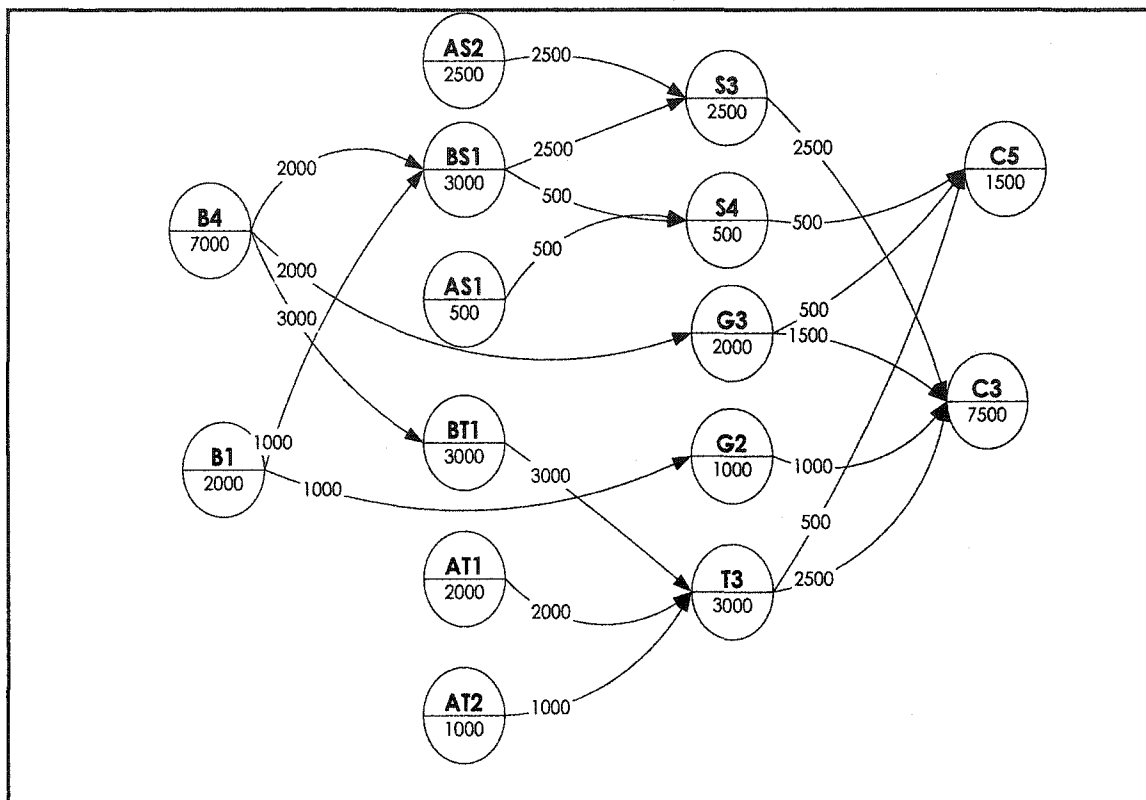


Figure 23 VMN du produit E

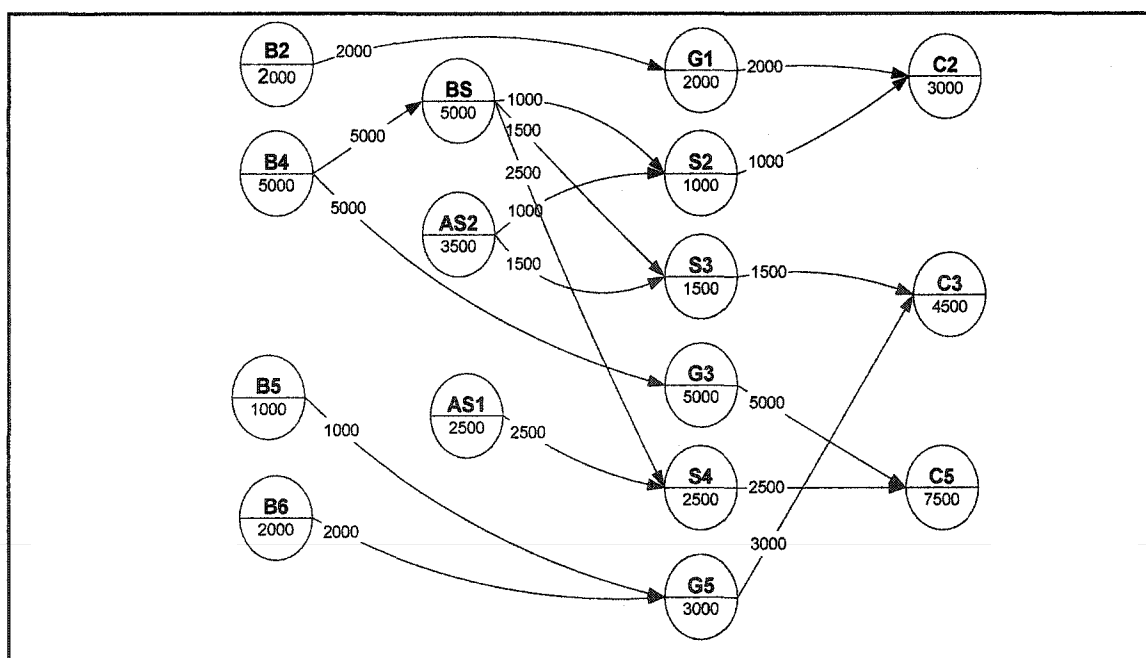


Figure 24 VMN du produit F

#### 4.6 Interaction des niveaux de qualité entre échelons

L'analyse des répercussions du niveau de la qualité des intrants montre que l'accroissement du nombre de composants requis pour une étape d'assemblage fait diminuer le niveau de la qualité de cette opération. La figure 25 présente une légende permettant d'interpréter l'interaction du niveau de qualité d'un réseau manufacturier. Nous présentons les niveau de la qualité de chacun des intervenants  $p_n$ , le niveau de la qualité après contrôle des intrants  $AOQ_{n-1}$ , la probabilité conjointe du processeur et des intrants  $P(p_n UAOQ_{n-1})$  (équation 3.3) et finalement, le niveau de la qualité après contrôle sortant  $AOQ_n$ .

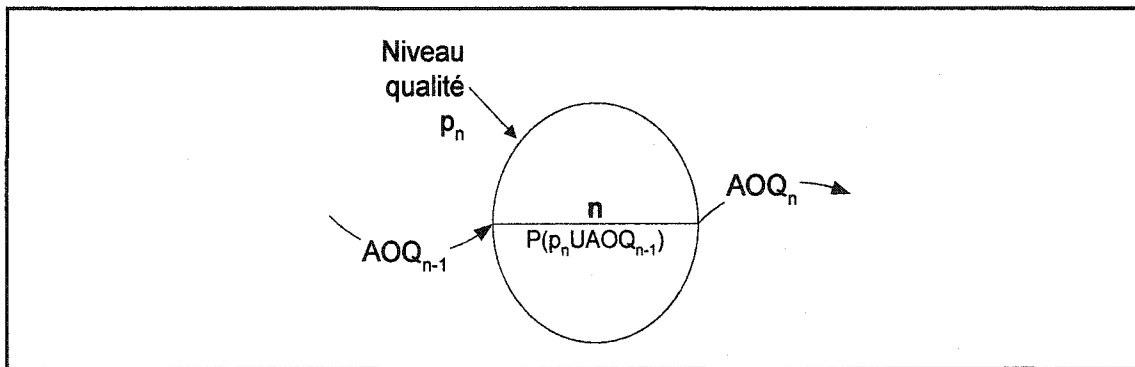


Figure 25 Légende VNM avec interaction de la qualité d'un réseau

Par exemple, le degré de conformité passe de 0.78% à l'étape  $T3$  à 1.04% en considérant l'interaction avec le niveau  $AOQ$  sortant de  $BT1$  et  $AT2$ , tel que présenté à la figure 26. Dans ces conditions, la probabilité d'acceptation d'un lot de 1000 unités, sortant de  $T3$ , est de 6%% avec un nombre moyen d'inspection de 955 unités. Avec un coût d'inspections unitaire de 3\$, selon l'équation 3.6, ce coût réparti sur l'ensemble des unités effectives du lot sera:

$$c' = 6 * (1 - 6\%) + \frac{270 * (6\%)}{1000} = 2.87\$$$

Il s'agit du même raisonnement pour les coûts de non-conformité. La figure 26 présente l'interaction de la qualité pour le réseau manufacturier dédié au produit A. Cette analyse permet d'expliquer le comportement du niveau de la qualité entre échelon. On voit que l'augmentation du nombre d'interactions fait augmenter le niveau de non-conformité d'un processeur, ce dernier étant contraint par le niveau de qualité des intrants. Par exemple, le tableau E requière 1 composante G, T et S. Le niveau de qualité sans inspection est de Nous vous renvoyons à la section 3.5.1 où nous présentons de façon théorique l'effet des interactions du niveau de la qualité entre les échelons.

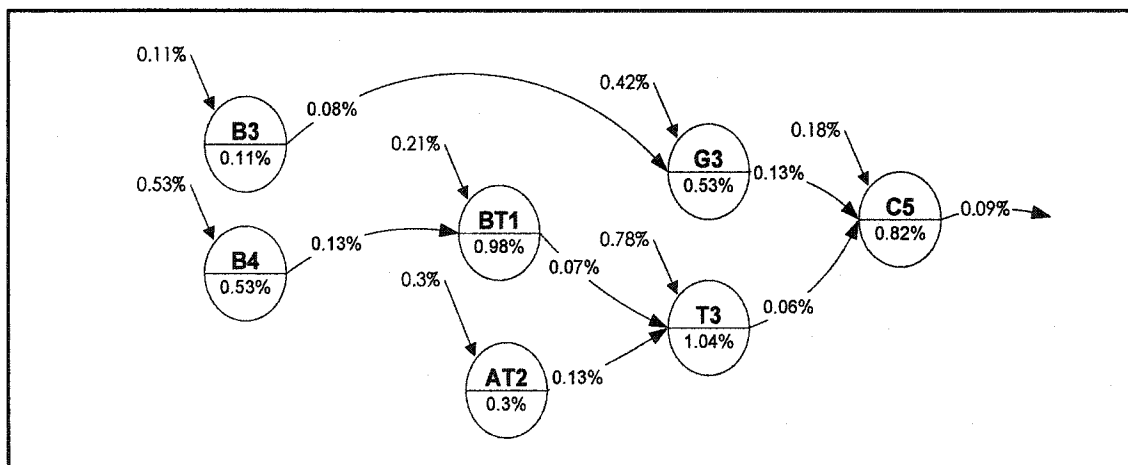


Figure 26 Niveau de qualité et interaction, produit A

Ajoutons qu'après un certain point défini par l'AOQL, la diminution du niveau de la qualité entraîne une augmentation du niveau de la qualité après contrôle. Par exemple, l'AOQ du fournisseur AT2 a un niveau de qualité effective de 0.3%, et après contrôle, le niveau passe à 0.13%. Alors que pour le sous-traitant T3, le niveau de qualité après contrôle est de 0.06% pour un niveau de qualité effectif de 1.04%. En sommes, un faible niveau de qualité, engendre plus d'inspections et améliore le niveau de qualité moyen après contrôle.

#### **4.7 Conclusion**

On peut employer ce modèle de programmation pour la sélection des fournisseurs et la planification globale de leur production. Un ensemble de paramètres dont les coûts de transport, de production et de qualité ont une pondération dans le choix des fournisseurs. Les coûts de la qualité sont dépendants du degré de protection associé aux plans d'échantillonnage, ce qui a une influence importante sur le niveau de qualité des activités en aval et donc sur la détermination des patrons de charges.

On souhaite maintenant employer ce modèle dans la sélection des niveaux de contrôle spécifique aux étapes de fabrication, qui est le troisième objectif visé par ce travail de recherche. Dans le prochain chapitre, nous établirons ces niveaux par expérimentations et analyses statistiques.

## **CHAPITRE 5**

### **APPROCHE EMPIRIQUE ET STRATÉGIE D'INSPECTION**

#### **5.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous ferons l'utilisation d'une méthodes d'analyse expérimentales pour évaluer l'effet des plans d'inspection sur le coût total. Ces essais nous conduiront à déterminer les points d'inspection stratégiques les plus économiques à l'intérieur d'une chaîne d'approvisionnement, lors de l'établissement d'un patron de flux et de charge présenté au chapitre précédent.

Rappelons que le troisième objectif de cette recherche est de planifier simultanément la production d'un réseau manufacturier et la stratégie d'inspection des composants à chacun des niveaux de production. Cette stratégie fait appel aux plans d'échantillonnage développés par Dodge Romig (1959). En effet, la résolution par programmation linéaire nous permet de considérer l'ensemble des paramètres de coûts et de capacité des fournisseurs. Cependant, la détermination de la taille d'échantillonnage et du critère d'acceptation exige des équations (3.6 et 3.9) non linéaires. De ce fait, le besoin d'expérimentation est priorisé afin d'identifier la stratégie de contrôle qui détermine des coûts optimales d'inspection et de non-conformité. Ces derniers coûts se comportent dans des sens opposés. Par exemple, à un extrême, n'effectuer aucune inspection des lots engendra des coûts de non-conformité élevé et rendra les coûts d'inspection inexistant. Dans cette perspective, un fournisseur ayant un niveau de qualité élevé aura un avantage concurrentiel, générant un faible coût de non-conformité.

Concernant la structure de ce chapitre, la section 5.2 présentera la méthodologie adoptée afin d'appliquer l'approche expérimentale. À la section 5.3, nous présenterons les méthodes d'évaluation de la qualité des lots. Après quoi, à la section 5.4 nous présentons le diagramme expérimentale resprésentant les variables indépendantes, le systèmes et les variables de réponses. À la section 5.5, nous identifierons les niveaux

d'inspections par échelons à l'aide des plans de surface de réponse. Des plans de raffinement seront présentés à la section 5.6. Finalement à la section 5.7, nous analyserons les résultats obtenus pour tirer des conclusions sur le comportement des variables du système.

## 5.2 Méthodologie

On met en relief les étapes permettant de déterminer l'effet de la qualité sur les coûts d'un réseau, tel que présenté à la figure 27. D'abord, nous sélectionnerons les tailles d'échantillon et les critères d'acceptation correspondant à des plans spécifiques, ce qui nous permettra par la suite d'indexer les coûts d'inspection et de non-conformité. Troisièmement, l'exécution du programme linéaire permettra d'établir le réseau qui minimisera l'ensemble des coûts. En dernier lieu, une série d'expérimentations sera effectuée afin d'analyser statistiquement la variation des degrés de sévérité de l'inspection sur les coûts du réseau. En somme, cette méthode nous indiquera les paramètres de contrôle appropriés pour minimiser les coûts totaux du réseau.

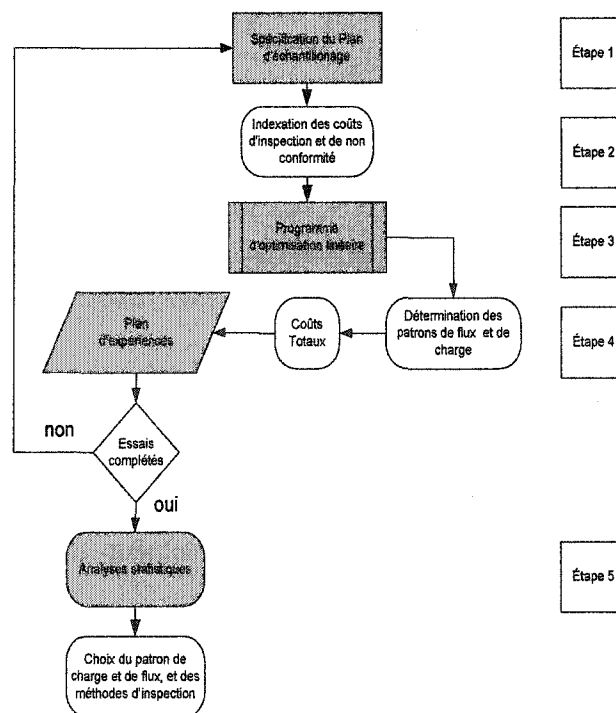


Figure 27 Méthodologie de planification d'un réseau manufacturier



### 5.3 Méthodes d'évaluation de la qualité des lots

La variabilité dans la qualité des lots est un facteur important. Lorsque l'historique du fournisseur démontre un niveau de qualité très élevé et constant entre les lots, une inspection réduite est requise. Quand ce niveau est constamment en deçà des exigences, il est plus économique d'effectuer une plus sévère inspection à 100% (Juran et al., 2001). Finalement, lorsque le niveau de qualité d'un lot fluctue, une comparaison économique des trois stratégies d'inspection est requise. L'échantillonnage est en pratique la disposition préférable lorsque le niveau de conformité oscille entre les niveau de qualité acceptable par le client. Voyons mathématiquement la façon dont ces constats se définissent.

#### 5.3.1 Points d'équilibre

Il existe trois situations lors de l'évaluation de la qualité, soit de n'effectuer aucune inspection, d'inspecter par échantillonnage ou d'inspecter à 100%. Le choix économique de l'un de ces trois choix demande une évaluation des coûts totaux. Les équations 5.1 à 5.3 présentent les coûts totaux des trois stratégies d'évaluation de la qualité.

$$CT = NpC^D \quad (5.1)$$

$$CT = nC' + pC^D P_a (N - n) + (N - n)(1 - P_a)C' \quad (5.2)$$

$$CT = NC' \quad (5.3)$$

En égalisant les équations 5.1 à 5.3, l'on trouve un point d'équilibre, défini par l'équation 5.4, qui renseigne sur la stratégie à adopter.

$$P_e = C' / C^D \quad (5.4)$$

Incidentement, quand  $p$  est en deçà de  $P_e$ , le coût de qualité est minimisé par un contrôle sans inspection ou par échantillonnage. Quand  $p$  est au-delà de  $P_e$ , une inspection à 100% est plus économique. Par exemple, une inspection complète est plus économique lorsque le coût d'inspection est inférieur au coût des pièces non conformes détectés chez le client. Pour plus de détails, Cyrus (1964) discute des points d'équilibre dans les cas où l'inspection est destructive et non destructive. Quant à Dayton (1977), il a examiné l'effet de l'erreur d'inspection dans une inspection complète à 100%.

### 5.3.2 Interactions des échelons

Compte tenu de l'interaction entre chacun des niveaux, décrit à la section 4.6, il est nécessaire de fixer la stratégie de l'ensemble des échelons de façon simultanée. Dépendamment de la stratégie adoptée pour le premier échelon, le niveau de conformité de l'étape 2 sera influencée. Par exemple, pour le sous-traitant *BS\_1*, son niveau de non-qualité est de 0.87%. En incluant l'influence de la qualité des pièces de B, son niveau de non-qualité peut aller jusqu'à 0.1169%. Avec un point d'équilibre à 0.1048% la stratégie d'inspection en amont, déterminera le besoin d'inspection de *BS\_1*. Il y a donc une interaction entre les coûts de non-conformité, d'inspection et le niveau de qualité entre chaque niveau. Nous référons à l'annexe 3 pour le détail de ces chiffres.

## 5.4 Préparation des expérimentations

Dans cette section, nous planifions des expérimentations qui mettent en relief l'influence des coûts de la qualité dans l'attribution des quantités aux différents sous-traitants du réseau. D'une part, les variables indépendantes sont les niveaux de protection caractérisés par le niveau limite de la qualité après contrôle *AOQL* de chaque échelon. L'*AOQL* est préférée au niveau limite de qualité tolérée par lot *LTPD* puisque nous sommes en présence de groupes de lots (Baillargeons 1995). Les paramètres des coûts de fabrication et de transport sont gardés constants pour faire

ressortir l'influence de la qualité sur l'attribution des quantités et des coûts. D'autre part, la variable dépendante représente le coût total incluant le transport, la production, l'inspection et la non-conformité. Le diagramme expérimental 28 schématise l'ensemble des variables retenues lors des expériences.

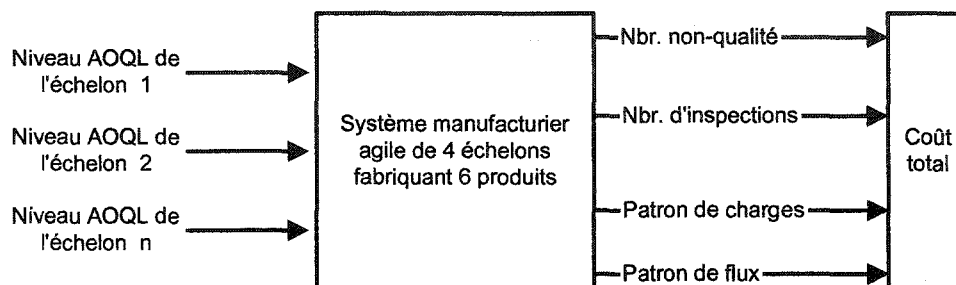


Figure 28 Diagramme expérimental

### 5.5 Expérimentation avec des plans d'échantillonnage

Rappelons que les plans développés par Dodge et Romig (1959) sont conçus de façon à établir un système de contrôle, lot par lot, avec un contrôle à 100% des lots non acceptés. De plus, ces plans sont caractérisés, dans le cas des groupes de lots de 1000 unités, par la limite de qualité moyenne après contrôle AOQL. Ainsi, la deuxième série d'expérimentation s'effectuera avec trois plans d'inspection caractérisés par des AOQL de 0.1%, 0.5% et 3%, présentés au tableau XI.

Tableau XI

Plans d'échantillonnage (n, c) caractérisé par AOQL

Protection AOQL	Plan	
	n	c
0.1%	270	0
1.5%	85	2
3%	44	2

Les figures 29, 30 et 31 présentent dans l'ordre les courbes d'efficacité, la quantité moyenne contrôlée à long terme et le niveau de la qualité des lots après contrôle pour chacun de ces plans.

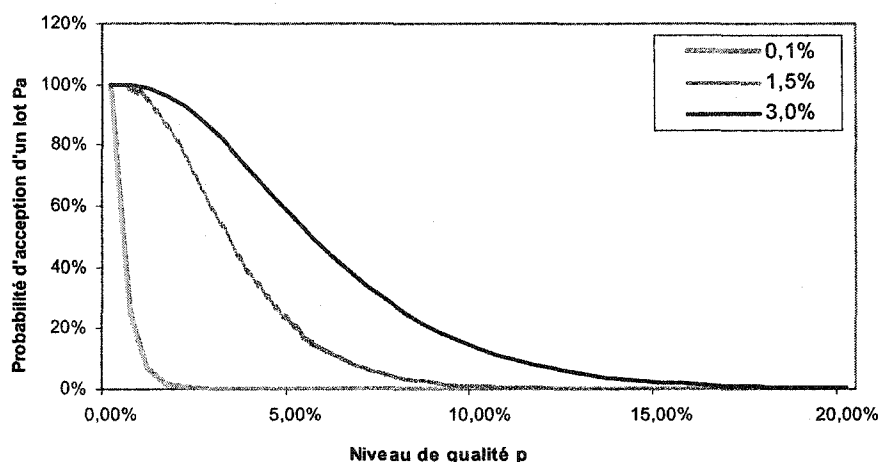


Figure 29 Courbe OC des plans AOQL 0.1%, 1.5% et 3%

On constate que la diminution du niveau de la qualité fait diminuer la probabilité d'accepter un lot (figure 29), entraînant ainsi l'augmentation du nombre d'inspections des pièces d'un lot (figure 30), ce qui se caractérise par un niveau de la qualité moyen après contrôle (figure 31) qui diminue après l'atteinte du niveau limite de la qualité moyenne après contrôle

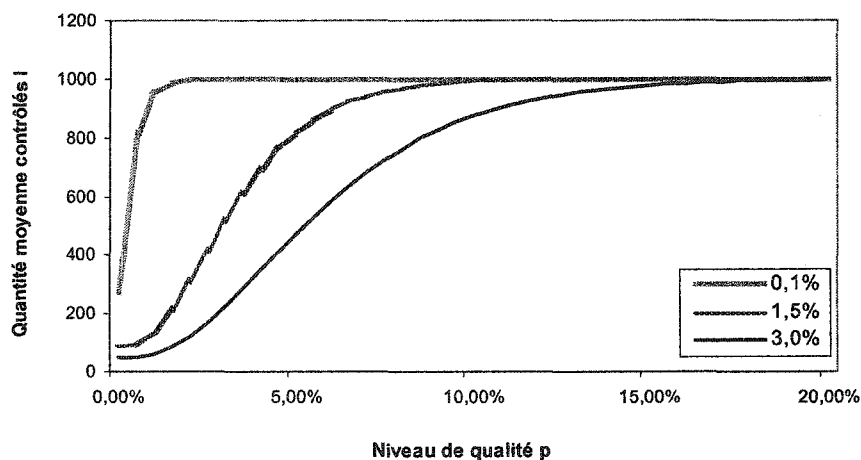


Figure 30 Courbe I des plans, AOQL 0.1%, 1.5% et 3%

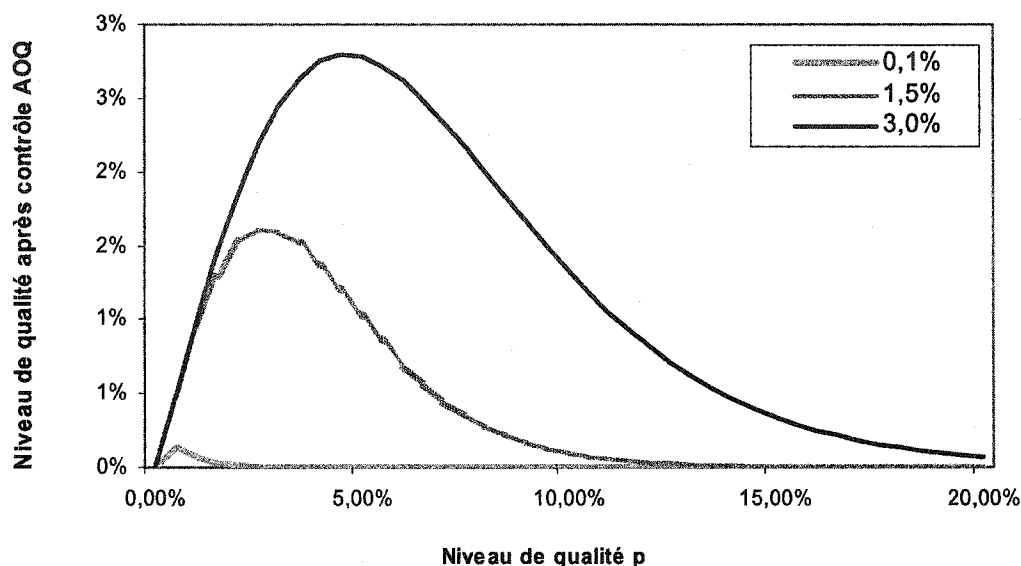


Figure 31 Courbe AOQ des plans AOQL 0.1%, 1.5% et 3%

### 5.5.1 Analyse des plans d'échantillonnage

Nous présentons dans cette section une analyse des plans d'inspection caractérisés par un AOQL de 0.1% réalisé avec l'aide du logiciel Statgraphics version 5. Ce plan établit l'inspection d'un échantillon de 270 items à partir d'un lot effectif de 1000 unités. L'acceptation du lot est conditionnelle à l'interception d'aucun non conformité Le risque du fournisseur,  $\alpha$ , représentant la probabilité de ne pas accepter un lot de qualité acceptable AQL est de 27%. Le risque du client,  $\beta$ , représentant la probabilité d'accepter un lot de qualité inacceptable, défini par le niveau limite de qualité tolérée *LTPD*, est de 0.00001%. À ce niveau, le nombre moyen d'inspections sera de 1000 unités. Le tableau suivant synthétise l'analyse sommaire de ce plan d'inspection et les tableaux XII et XIV présente respectivement l'analyse des plans ayant des AOQL de 0.5% et 3%.

Tableau XII

## Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 0.1%

## Existing plan

-----  
 Sample size (n) = 270  
 Acceptance number (c) = 0

## Plan attributes

-----  
 Acceptable quality level (AQL): 0,1%  
 Producer's risk (alpha) = 27,0%  
 Lot tolerance percent defective (LTPD): 5,0%  
 Consumer's risk (beta) = 0,00000914786%

Average Outgoing Quality Limit (AOQL) = 0,085224% at 0,316756% defective  
 Average Total Inspection (ATI) =  
     467,1 units per lot at the AQL  
     730,947 units per lot at the AOQL  
     1000,0 units per lot at the LTPD

Tableau XIII

## Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 1.5%

## Existing plan

-----  
 Sample size (n) = 85  
 Acceptance number (c) = 2

## Plan attributes

-----  
 Acceptable quality level (AQL): 1,5%  
 Producer's risk (alpha) = 12,8098%  
 Lot tolerance percent defective (LTPD): 5,0%  
 Consumer's risk (beta) = 18,3782%

Average Outgoing Quality Limit (AOQL) = 1,46839% at 2,57717% defective  
 Average Total Inspection (ATI) =  
     202,209 units per lot at the AQL  
     430,23 units per lot at the AOQL  
     831,839 units per lot at the LTPD

Tableau XIV

## Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 3

## Existing plan

-----  
 Sample size (n) = 44  
 Acceptance number (c) = 2

## Plan attributes

-----  
 Acceptable quality level (AQL): 3,0%  
 Producer's risk (alpha) = 14,1254%  
 Lot tolerance percent defective (LTPD): 5,0%  
 Consumer's risk (beta) = 62,0473%

Average Outgoing Quality Limit (AOQL) = 2,96586% at 5,00337% defective  
 Average Total Inspection (ATI) =  
     179,039 units per lot at the AQL  
     407,227 units per lot at the AOQL  
     406,828 units per lot at the LTPD



### 5.5.4 Analyse statistique de l'ensemble des facteurs

L'analyse de la variance du tableau XVI présente un coefficient de détermination, entre le modèle et les données, de 95.32%. Nous distinguons que les facteurs linéaires de l'échelon 1, 3 et 4 ont une influence significative sur la réponse

Tableau XVI

#### ANOVA des expériences du système manufacturier

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:AOQL_1	1,14277E10	1	1,14277E10	73,08	0,0000
B:AOQL_2	5,00718E10	1	5,00718E10	320,20	0,0000
C:AOQL_3	2,21145E9	1	2,21145E9	14,14	0,0027
D:AOQL_4	6,92562E8	1	6,92562E8	4,43	0,0571
AA	3,61826E9	1	3,61826E9	23,14	0,0004
AB	4,81256E6	1	4,81256E6	0,03	0,8637
AC	5,57986E8	1	5,57986E8	3,57	0,0833
AD	6,71852E6	1	6,71852E6	0,04	0,8393
BB	1,62732E10	1	1,62732E10	104,07	0,0000
BC	3,68237E7	1	3,68237E7	0,24	0,6362
BD	6,72266E7	1	6,72266E7	0,43	0,5244
CC	5,5208E6	1	5,5208E6	0,04	0,8541
CD	1,54677E9	1	1,54677E9	9,89	0,0085
DD	6,13263E8	1	6,13263E8	3,92	0,0711
Total error	1,8765E9	12	1,56375E8		
Total (corr.)	8,68025E10	26			

R-squared = 97,8382 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 95,3161 percent

Au niveau graphique, l'analyse de PARETO illustre ce constat. À la figure 32, les facteurs linéaires et leurs interactions sont déterminants.

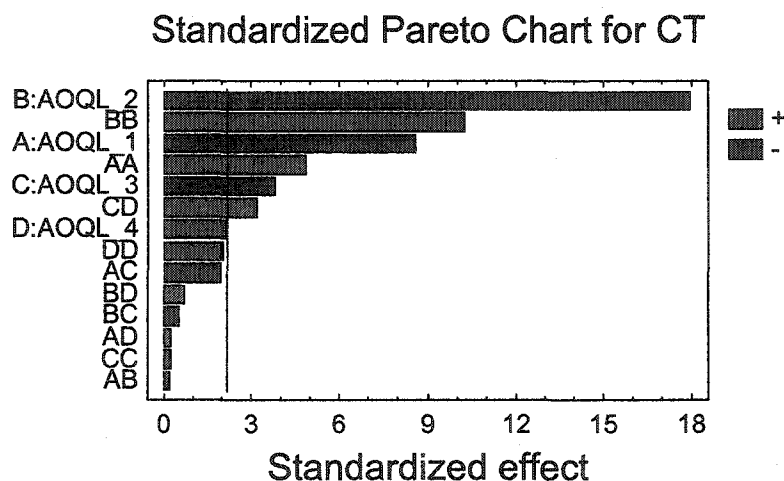


Figure 32 Diagramme de Pareto de la signification des facteurs



La surface de réponse de la figure 33 présente les coûts totaux par rapport aux niveaux de contrôle. La pente descendante de l'AOQL du premier échelon confirme l'économie de ne pas inspecter. Le deuxième échelon, influencé par son interaction avec le troisième, présente un minimum lorsque l'AOQL est entre 1% et 2%, considérant les facteurs non significatifs.

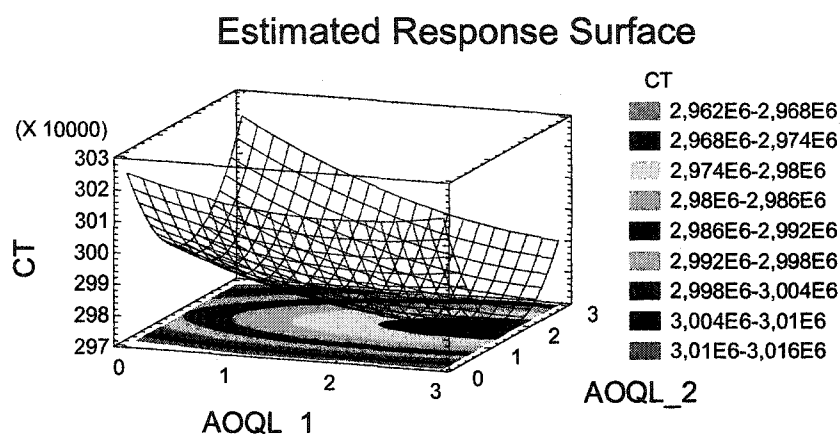


Figure 33 Surface de réponse des inspections de l'échelon 1 et 2

À la figure 34, on y distingue une région qui prescrit le type de contrôle qui minimise les coûts. Un optimum est obtenu dans une région délimitée par des valeurs de l'AOQL allant de 2% à 3% pour le troisième échelon. À l'échelon 4, la région est délimitée entre 0 et 1%.

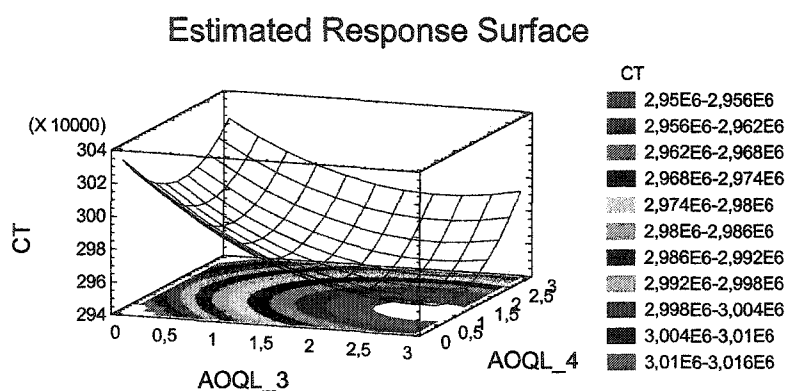


Figure 34 Surface de réponse des inspections de l'échelon 3 et 4

### 5.5.5 Analyse statistique des facteurs significatifs

Une fois le retrait des facteurs n'ayant pas d'influence, le coefficient de détermination reste sensiblement inchangé. Ainsi, le modèle de prédiction réalisé explique la variation à 96.48% (tableau XVII). Cette analyse de la variance nous présente que le niveau de protection de tous les échelons ont une influence statistiquement significative sur les coûts du modèle et que l'échelon 2 est le facteur le plus important, tel qu'illustré par la figure 35.

Tableau XVII

#### ANOVA des facteurs significatifs

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Factor_A	1,14672E10	1	1,14672E10	97,59	0,0000
B:Factor_B	5,03087E10	1	5,03087E10	428,13	0,0000
C:Factor_C	2,19852E9	1	2,19852E9	18,71	0,0005
D:Factor_D	6,72319E8	1	6,72319E8	5,72	0,0286
AA	4,17665E9	1	4,17665E9	35,54	0,0000
AC	5,5788E8	1	5,5788E8	4,75	0,0437
BB	1,85303E10	1	1,85303E10	157,69	0,0000
CD	1,54662E9	1	1,54662E9	13,16	0,0021
DD	7,34277E8	1	7,34277E8	6,25	0,0230
Total error	1,99764E9	17	1,17508E8		
Total (corr.)	8,68025E10	26			

R-squared = 97,6986 percent  
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,4803 percent

Standardized Pareto Chart for Var\_1

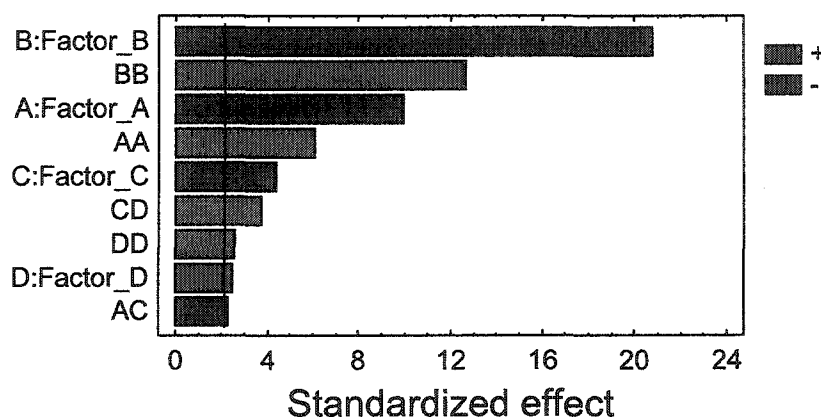


Figure 35 Pareto des facteurs significatifs

De plus, le premier échelon peut pour sa part être déterminé de façon dépendante. Dans ce cas, les coûts d'inspection et de non-conformité définissent des points d'équilibre de 22.29% pour les fournisseurs B, 5.05% pour les fournisseurs AS et 16.81% pour les fournisseurs AT. Compte tenu des niveaux moyens de qualité respectifs de 0.38%, 0.58% et 0.28%, il est plus économique de ne pas contrôler la qualité à ce niveau. Concernant ce troisième échelon, il est plus rentable de ne pas inspecter. Le rapport du coût de non-conformité sur le coût d'inspection (S : 6.33% et T : 7.04%) se situe au-delà des niveaux de qualité des fournisseurs (S : 0.6% et T 0.6%), tel que présenté dans l'annexe 3.

#### 5.5.6 Homogénéité des variances

Nous avons un modèle stable puisque le graphique de la figure 36 présente une homogénéité des variances. En comparant les données observées à ceux prédites, on observe que les points suivent le long de la diagonale sans écart significatif.

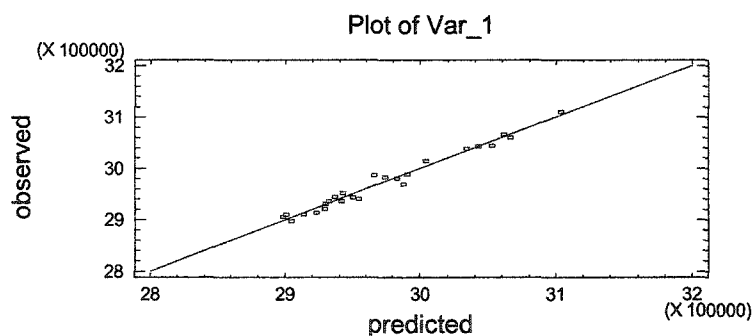


Figure 36 Résultats observés en relation avec les résultats prédits

#### 5.5.7 Résidus du modèle

L'observation de la distribution normale des résidus de la figure 37 illustre que l'ensemble de résidus suit le long de la ligne oblique. Conséquemment, aucune

modification du domaine expérimental n'est nécessaire pour d'éventuelles améliorations du modèle. Il est préférable d'appliquer des transformations à la réponse plutôt que de reprendre des essais ailleurs dans le domaine.

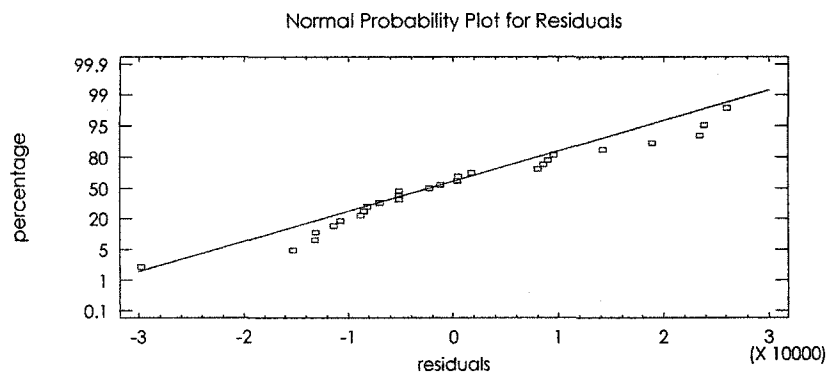


Figure 37 Distribution de la normalité des résidus

De plus, à partir de la figure 38, nous n'observons aucun patron particulier dans les résidus pouvant nous faire croire qu'un effet linéaire ou de second degré est manquant.

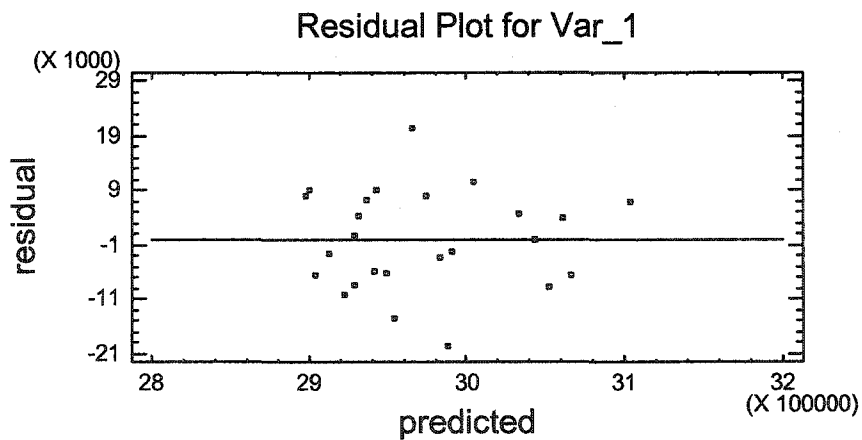


Figure 38 Distribution des résidus du modèle

### 5.5.8 Modèle de régression du coût total

Le modèle de régression du coût total du patron de charge et de flux est donné par l'équation 5.5. Cette équation a l'utilité de prédire le coût total du réseau pour toutes modifications dans la pondération des coûts d'inspection et des coûts de non-conformité générés par la modification du type de plan d'échantillonnage utilisé.

$$\begin{aligned} CT = & 3,15041E6 - 597,1*AOQL\_1 - 126718,0*AOQL\_2 - 15132,5*AOQL\_3 - \\ & 25654,4*AOQL\_4 + 12567,9*AOQL\_1^2 + 4,19095E-9*AOQL\_1*AOQL\_2 - \\ & 5612,55*AOQL\_1*AOQL\_3 + 26472,2*AOQL\_2^2 - 9,31323E-10*AOQL\_2*AOQL\_3 + \\ & 2,32831E-10*AOQL\_2*AOQL\_4 + 9345,06*AOQL\_3*AOQL\_4 + 5269,61*AOQL\_4^2 \quad (5.5) \end{aligned}$$

### 5.5.9 Interprétation des résultats

Dans la section précédente, nous avons validé la signification statistique du modèle de prédiction qui explique à près de 96.48% ( $R^2$ ) la variation des différentes configurations du réseau en fonction des paramètres d'évaluation de la qualité. En observant plus en détail l'effet individuel de chacun des facteurs principaux, nous remarquons l'obtention d'un coût minimal lorsque les plans d'échantillon ont un niveau de qualité limite après contrôle près de 3% pour l'échelon 3 et 0.5% pour l'échelon 4. D'après le modèle de régression, les facteurs se comportent de façon convexe, tel qu'illustré par la figure 29. Ces résultats nous motivent donc à raffiner nos résultats avec des expérimentations supplémentaires.

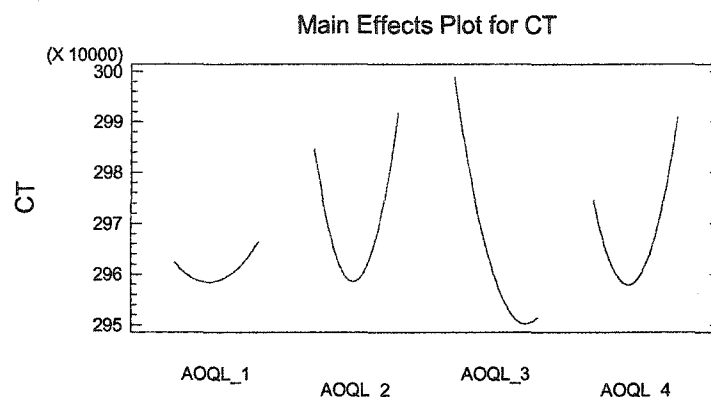


Figure 39 Comportement des effets principaux

## 5.6 Plan de raffinement

Les deux premières séries d'expérimentations ont déterminé un échantillonnage avec un AOQL entre 1% et 3% pour l'échelon 1, entre 1 et 2% pour l'échelon 2 et entre 0,1% et 2% pour l'échelon 4. Ces paramètres vont devenir le domaine du plan d'expérimentation suivant nous permettant de raffiner le niveau des facteurs. Voyons de quelle façon se caractérisent ces plans d'échantillonnage.

### 5.6.1 Analyse des plans d'échantillonnage

Le plan caractérisé par l'AOQL de 1% établit l'inspection d'un échantillon de 120 items à partir d'un lot effectif de 1000 unités. L'acceptation du lot est conditionnelle à l'interception de 2 non-conformités ou moins. Avec une inspection exhaustive de l'ensemble des pièces et le remplacement des non-conformités, le niveau de qualité après contrôle sera de 0.99%. Le même raisonnement est appliqué pour un AOQL de 2%. Les tableaux XVIII et XIX synthétisent l'analyse sommaire de ces plans d'inspections.

Tableau XVIII

Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 1%

Existing plan
-----
Sample size (n) = 120
Acceptance number (c) = 2
Plan attributes
-----
Acceptable quality level (AQL): 1,0%
Producer's risk (alpha) = 10,7699%
Lot tolerance percent defective (LTPD): 5,0%
Consumer's risk (beta) = 4,7233%
Average Outgoing Quality Limit (AOQL) = 0,999303% at 1,80911% defective
Average Total Inspection (ATI) =
214,775 units per lot at the AQL
447,627 units per lot at the AOQL
958,435 units per lot at the LTPD

Tableau XIX

## Analyse sommaire du plan d'inspection, AOQL 2%

```

Existing plan
-----
Sample size (n) = 65
Acceptance number (c) = 2

Plan attributes
-----
Acceptable quality level (AQL): 2,0%
Producer's risk (alpha) = 13,5465%
Lot tolerance percent defective (LTPD): 5,0%
Consumer's risk (beta) = 35,4535%

Average Outgoing Quality Limit (AOQL) = 1,96315% at 3,38286% defective
Average Total Inspection (ATI) =
    191,66 units per lot at the AQL
    419,677 units per lot at the AOQL
    668,51 units per lot at the LTPD

```

## 5.6.2 Sélection du plan d'expériences

Nous ferons l'utilisation d'un plan factoriel complet  $3^2$ , pour un total de 9 essais. Le tableau XX présente les caractéristiques de ce plan. On retrouve à annexe 5 le tableau de la valeur de chaque essais. Les réplifications ne sont pas nécessaires puisque nous simulons avec un modèle déterministe.

Tableau XX

## Spécification du plan factoriel à plusieurs niveaux

```

Base Design
-----
Number of experimental factors: 3   Number of blocks: 1
Number of responses: 1
Number of runs: 15                 Error degrees of freedom: 5
Randomized: Yes

Factors          Low          High          Units          Continuous
-----
AOQL_1           1            3             %              Yes
AOQL_2           1            2             %              Yes
AOQL_4           0.1          2             %              Yes

Responses        Units
-----
CT               $

```

L'analyse de la variance présente la signification des facteurs sur la réponse avec coefficient de corrélation de 99.98%, présenté dans le tableau XXI. Les facteurs A, B et AA sont statistiquement significatifs.

Tableau XXI

## ANOVA des inspections pour l'échelon 3 et 4

Analysis of Variance for CT					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:AOQL_1	2,70712E8	1	2,70712E8	9534,47	0,0000
B:AOQL_2	1,69478E9	1	1,69478E9	59690,36	0,0000
C:AOQL_4	1,52819E8	1	1,52819E8	5382,29	0,0000
AA	2,70892E7	1	2,70892E7	954,08	0,0000
BB	2,26306E8	1	2,26306E8	7970,52	0,0000
BC	247009,0	1	247009,0	8,70	0,0214
CC	6,43785E7	1	6,43785E7	2267,41	0,0000
Total error	198751,0	7	28392,9		
Total (corr.)	2,40529E9	14			
R-squared = 99,9917 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9835 percent					

Une fois les facteurs non significatifs exclus, on observe sur le graphique de surface de réponse que les coûts sont sensiblement les mêmes pour une inspection à 100% ou un échantillonnage avec un AOQL de 1% à l'échelon 1, tel qu'illustré à la figure 40 et 41. La probabilité d'acceptation des lots est à toute fin pratique nulle avec un AOQL de 1% et conséquemment l'ensemble des pièces seront inspectés à 100%. On explique ce fait par l'interaction entre le niveau de qualité des intrants G, S et T avec le niveau de qualité d'assemblage finale C. Concernant l'échelon 2, la surface présente un coût minimum atteint avec le niveau d'AOQL se situant entre 1.5 et 2.

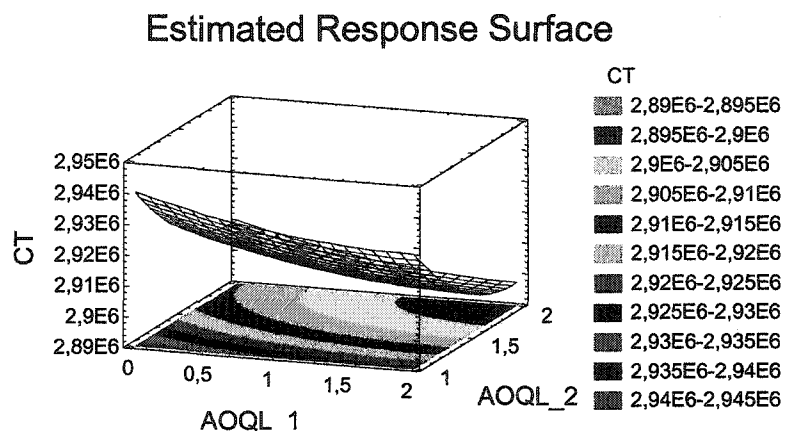


Figure 40 Surface de réponse du plan de raffinement



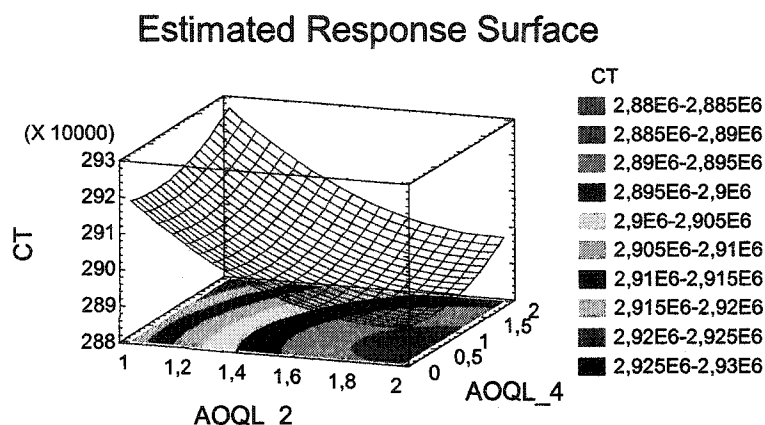


Figure 41 Surface de réponse du plan de raffinement

## 5.7 Analyse de sensibilité

Dans cette section, nous effectuerons des analyses de sensibilité pour étudier le comportement du modèle en fonction de la taille des lots et en fonction d'une variation des coûts de la qualité.

Notons que l'ensemble des contraintes et des paramètres rend complexe le suivi de chacun des coûts individuellement et l'identification d'une tendance par fournisseurs. Notre base de référence sera les coûts totaux et les niveaux d'inspection. Ainsi, nous allons nous concentrer sur la variation de la taille des lots, des coûts d'inspection et des coûts de non-conformité au niveau des points d'inspection de l'échelon 3 et 4.

### 5.7.1 Influence de la taille du lot sur les coûts totaux

Pour la première analyse de sensibilité, on cherche à déterminer des tailles de lots effectives en fonction des niveaux d'inspection pour les échelons du réseau qui minimisent les coûts. L'évolution du coût d'inspection s'explique par la variation du nombre moyen d'inspections, défini par l'équation suivante :

$$I = N \left( 1 - \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} \right) + \sum_c \frac{np^c e^{-np}}{c!} * n \quad (4.6)$$

Il nous est apparu que la diminution de la taille lot fait croître le nombre d'inspections. Par exemple, pour un niveau de qualité de 5%, un plan avec un échantillon de 46 unités et un critère d'acceptation de 5 unités a une probabilité d'acceptation de 92%. En utilisant la formule 4.6, le nombre moyen d'inspections pour une taille de lot de 100 est de 50.52 unités. Conséquamment, l'inspection de 10 lots, pour un total de 1000 unités génère un nombre moyen d'inspections de 505.23 unités. Alors que pour un lot effectif de 1000 unités, le nombre d'inspection moyen est de 125.89, avec une diminution de 75% du nombre d'inspections. Le graphique suivant illustre la variation du nombre moyen d'inspections pour un lot de 100, 500 et 1000 unités.

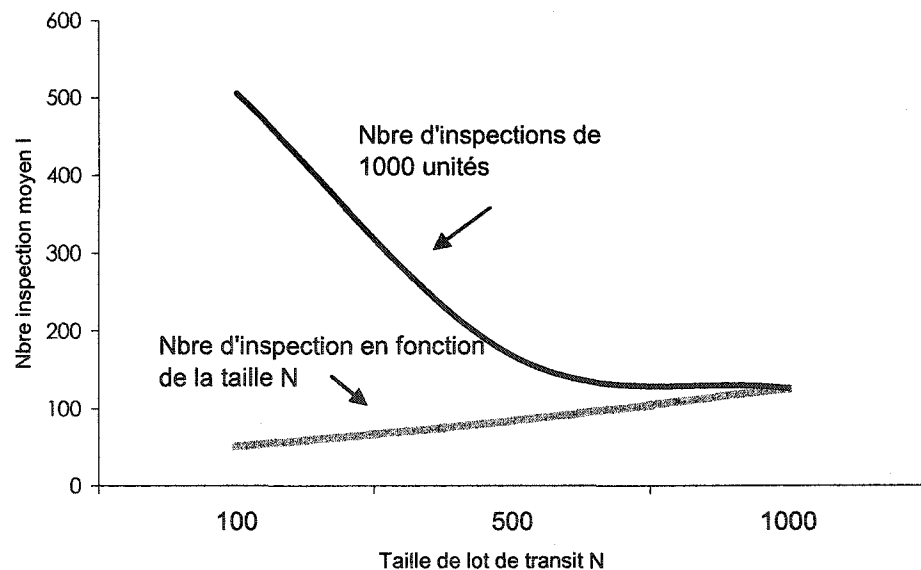


Figure 42 Nombre d'inspections en fonction de la taille du lot

## 5.7.2 Variation des coûts du réseau

Le plan de raffinement réalisé à la section 5.6 est repris dans cette analyse avec la modification des coûts d'inspection et de non-conformité. De ce fait, l'objectif est d'identifier la façon dont le coût total varie en fonction de la variation des coûts de la qualité et de la variation des plans d'échantillonnage. On présente ci-dessous quatre scénarios avec les coûts associés.

### 5.7.2.1 Influence des coûts d'inspection

Intuitivement, lorsque le coût d'inspection diminue, on a avantage à opter pour une stratégie d'augmentation de la sévérité du contrôle pour améliorer la qualité. En pratique, le modèle développé devrait suivre ce raisonnement. Lorsque le coût d'inspection diminue de 50% chez les sous-traitants G, S et T, la pente qui caractérise le coût total diminue avec une augmentation des inspections, engendrés par la diminution du niveau moyen de la qualité après contrôle. Dans ce dernier cas, un système d'inspections plus efficace limitant le nombre de défauts et demandant une gestion plus sophistiquée des inspections est requis. La figure 23 illustre ce comportement.

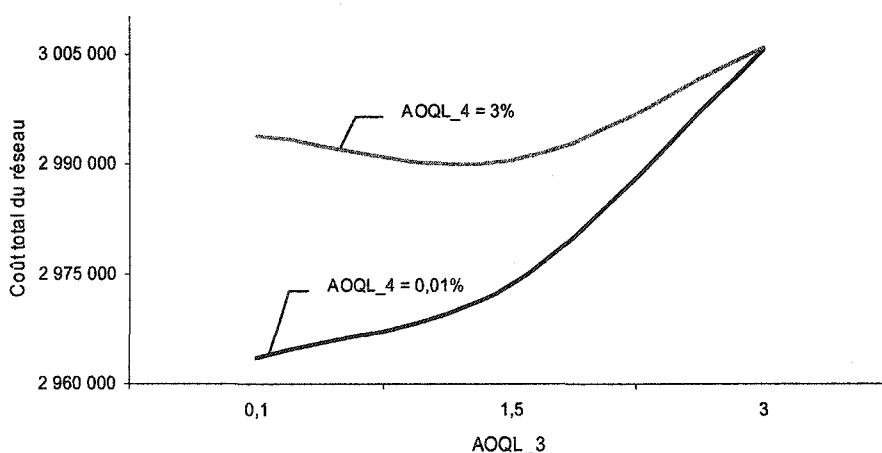


Figure 43 Coût total et variation à 50 % du coût d'inspection

Autrement, l'augmentation du coût d'inspection à 150% inverse l'orientation des pentes. On constate que cet accroissement du coût de contrôle entraîne une diminution du niveau de sévérité pour minimiser les coûts totaux à la figure 44. Lorsque le niveau de sévérité à l'échelon trois se resserre en en bas d'un AOQL de 0.5%, il est plus économique d'avoir un AOQL de 0.1% à l'échelon quatre.

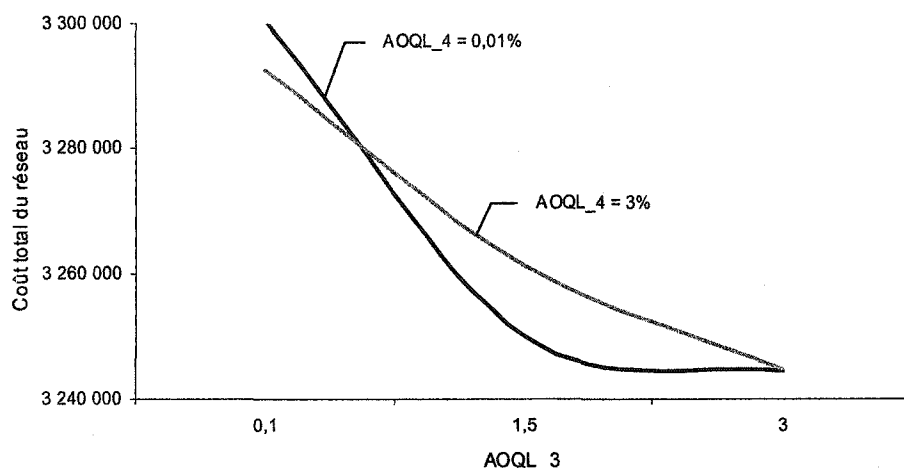


Figure 44 Coût total et variation à 150 % du coût d'inspection

### 5.7.3 Comparaison entre les stratégies d'inspection

Pour cette comparaison, les demandes, les capacités et les coûts restent inchangés. Au niveau du contrôle à 100%, toutes les pièces seront inspectées, ce qui ne générera aucune non-conformité sortant des échelons du réseau manufacturier. On constate que l'inspection à 100% dans la planification fait élever les coûts totaux du réseau à 3 255 140.30\$. Néanmoins, avec les capacités limitées, la production se répartie en premier lieu avec les fournisseurs où la qualité est plus élevée et ensuite vers les fournisseurs qui ont un niveau de qualité inférieur. Le tableau XXIII présente les résultats des coûts totaux en fonction des différentes stratégies d'évaluation de la qualité.

Tableau XXII

Coût d'un réseau en fonction des stratégies d'évaluation de la qualité

<i>Stratégies d'évaluation de la qualité</i>	<i>CT</i>
Inspection à 100%	3 255 375,30 \$
Inspection selon un AOQL de 1%	3 190 072,40 \$
Inspection stratégique aux sous-traitants	2 889 491,90 \$
Variation	365 883,40 \$
Variation %	11,2%

D'un autre côté, définir une stratégie d'inspection par échantillonnage standard avec un AOQL de 1% à l'ensemble des fournisseurs démontre une diminution des coûts de 65,302,90\$ pour une diminution de 2% des coûts totaux. Néanmoins, c'est lorsque l'évaluation de la qualité est spécifique par échelon du réseau que les coûts totaux sont minimisés avec une économie de 365,883,40\$ pour une diminution de 11,2% du coût total du réseau en inspectant à 100%.

## 5.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application d'une approche d'analyse de sensibilité réalisée par l'entremise des plans d'expériences pour évaluer l'effet du niveau d'inspection sur les coûts totaux du modèle de planification. Nous avons démontré que le réglage des plans d'échantillonnage dépend des coûts liés à l'inspection des pièces et des coûts liés aux non-conformités. De plus, il a été démontré qu'il existe une interaction significative entre le niveau de sévérité des plans d'échantillonnage et les coûts de la qualité.

## CONCLUSION

La problématique de ce projet de recherche était d'inclure l'évaluation des coûts de qualité dans la planification d'un réseau manufacturier multi produits constitué de plusieurs échelons.

Le système manufacturier sur lequel nous nous sommes concentré représentait des installations fabriquant une gamme de produits ayant différentes nomenclatures. Dans une perspective de réseau, les intervenants représentant les nœuds d'un réseau étaient tous liés par des moyens de transport, illustrés par des arcs. De manière à établir un patron de flux et de charge à l'intérieur du réseau disponible, des choix de transports et de transformations étaient associées à la sélection des intervenants de la chaîne. Pour se faire, nous avons considéré des contraintes d'équilibrage de flux entre les échelons d'un système, le niveau de la qualité après contrôle à chacun des échelons et des capacités de fabrication respectives à chacun des sous-traitants.

Comme premier objectif, nous avons déterminé la méthode d'évaluation de la qualité. L'analyse des stratégies de contrôle présentait un point d'équilibre estimant le ratio du coût de non-conformité par rapport au coût d'inspection, ce qui prescrivait d'inspecter un lot à 100% ou de n'effectuer aucun contrôle de la qualité. Concernant le contrôle exhaustif à 100%, il est préférable de l'utiliser lorsque  $p$  est un paramètre déterministe et que les inspections sont physiquement réalisables sans relâche des inspecteurs lorsque l'inspection est dépendante des facteurs humains. Autrement, l'expérience a démontré qu'un plan d'échantillonnage adéquat est préférable au contrôle à 100%. Dans cette perspective, le critère qui caractérise les plans est le niveau moyen de qualité après le contrôle. Tout en respectant ce niveau de protection, nous avons fait l'utilisation des plans Dodge-Romig (1959) ayant pour caractéristique de minimiser la quantité moyenne de pièces contrôlées par lot, à long terme. L'utilisation d'une telle approche était nécessaire pour proposer un modèle de programmation linéaire minimisant les coûts totaux de planification d'un réseau manufacturier.

Le deuxième objectif était d'introduire des coûts de qualité dans un modèle de planification d'un réseau manufacturier de tableaux de bord de voitures. Considérant le niveau de qualité respectif de chacun des fournisseurs, nous avons indexé des coûts d'inspection et ceux de non-qualité. Avec cette démarche, un plan global déterminant la production de chacun des intervenants était élaborée minimisant l'ensemble des paramètres de coûts, effectuant un compromis entre le transport, la production et la qualité.

Le dernier objectif était d'établir l'influence du niveau de protection qui caractérise les plans de prélèvement. Nous avons comme hypothèse que l'inspection par échantillonnage permettrait de minimiser les coûts. De ce fait, l'utilisation d'une démarche de plans d'expérimentation nous a permis d'identifier qu'il existait une forte dépendance entre le choix du plan d'inspection par échelon du réseau et les coûts liés à la qualité.

Dans une perspective théorique, notre contribution se résume à l'intégration de l'évaluation de la qualité dans la détermination des patrons de flux et de charge d'un réseau manufacturier à plusieurs niveaux et plusieurs produits. À l'intérieur de notre approche de résolution, nous avons minimisé le nombre moyen d'inspections dans la sélection d'une stratégie d'inspection. Mentionnons par ailleurs que l'inspection n'est pas considérée comme une activité à valeur ajoutée puisqu'elle identifie les non-conformités, sans améliorer la qualité des produits (Kauffmann et al., 1996). Cependant, cette activité peut servir de catalyseur à l'amélioration des systèmes manufacturiers puisque l'information collectée au cours de l'inspection peut être avantageusement utilisées par le concepteur d'une chaîne d'approvisionnement.

Cette recherche documente au niveau quantitatif le besoin d'un niveau élevé de la qualité des composants circulant entre les échelons d'un système. Dans ce sens, notre recherche apporte un niveau de compréhension sur l'effet de la qualité échangée entre fournisseurs, questionnement relevé par les recherches empiriques effectuées par Mangiameli et al. (1999).

### Pistes de recherche

Cette recherche concernait la planification stratégique d'un réseau en intégrant les coûts de qualité. Néanmoins, il serait intéressant d'approfondir cette recherche afin d'inclure des aspects opérationnels. Parmi ces aspects, nous suggérons d'inclure l'aspect des délais d'approvisionnement générés par la réception de pièces non-conformes. Ainsi, une des problématiques serait d'identifier l'importance du niveau de la qualité sur la variation des délais d'approvisionnement.

Par ailleurs, le développement de différents modèles de planification pourrait être inspiré par l'addition des différents coûts de non-qualité du produit présenté au tableau II.

Finalement, il serait bénéfique d'ajuster le flux entre les échelons en fonction du niveau de qualité de ces derniers. Pour ce faire, les futures recherches devraient développer un langage de programmation non linéaire intégrant les probabilités d'acceptation des lots de pièces et le nombre de pièces nécessaires pour pallier les rejets.



## **ANNEXE 1**

### **LEXIQUES DES COÛTS DE LA QUALITÉ**

## 1. Coûts internes des défaillances

- ♦ **Rebuts, rejet** : Ce coût comprend les frais de main d'œuvre directe et indirecte, les matériaux et tous les autres frais reliés à la fabrication du produit. Les défauts entraînent l'élimination de l'article fini ou en cours de fabrication, en tout ou en partie.
- ♦ **Retouches** : Ce coût comprend le temps et les frais requis pour réparer une pièce non conforme. Les défauts n'entraînent qu'un surcroît de main d'œuvre, sans perte de matière première.
- ♦ **Réparation** : Ce coût comprend le temps, les frais et les matériaux nécessaires pour réparer les pièces non conformes. Les défauts engendrent l'élimination d'une partie de l'article reconstituée ensuite.
- ♦ **Remise en état** : Ce coût comprend le temps, les frais des matériaux nécessaires à la réparation de l'outillage qui fabriquait des pièces non conformes, ainsi que le temps et frais qu'entraîne une mise au point.

## 2. Coûts externes des défaillances

- ♦ **Remboursements** : Ce coût comprend tous les montants consentis aux clients pour des pièces livrées mais non conformes.
- ♦ **Dédommagements** : Ce coût comprend les crédits accordés aux clients pour des problèmes reliés aux articles vendus à ses derniers.
- ♦ **Remplacements des produits refusés** : Ce coût comprend les frais de transport pour aller chercher les produits non-conformes, les frais de transport pour livrer les produits de remplacement et le personnel administratifs qui traitent les retours.
- ♦ **Manque à gagner** : Ce coût comprend la différence entre le prix de vent habituel et le prix auquel l'article est effectivement vendu. L'article défectueux ou non conforme et les frais de transport pour livrer les produits de remplacement.
- ♦ **'Back charge'** : Ce coût comprend toutes les charges relatives à des travaux supplémentaires faits par un sous-traitant parce que les produits livrés étaient non conformes, et qu'il y a nécessité d'effectuer l'ouvrage non-compris dans le contrat initial.
- ♦ **Pénalités** : Ce coût comprend les montants qu'on a dû payer à cause de retards ou des problèmes occasionnés par la non-qualité.

- ♦ **Travaux non-facturés** : Ce coût comprend le temps, les matériaux et tous les autres frais dus aux travaux supplémentaires faits chez le client par les employés de l'entreprise pour des cas de non-conformité.
- ♦ **Coûts de garantie** : Ce coût comprend le temps, les matériaux et tous les autres frais occasionnés par le respect des garanties.

### 3. Coûts indirects

- ♦ **Assurances** : Ce coût comprend toutes les augmentations des coûts d'assurances dues au fait que les produits étaient non-conformes.
- ♦ **Litiges** : Ce coût comprend tous les frais encourus pour régler les litiges occasionnés par la non-conformité des produits ou des travaux. Ces litiges coûtent souvent très cher aux entreprises.
- ♦ **Gestion des produits défectueux** : Ce coût comprend tous les frais d'administration nécessaires pour gérer les produits non-conformes

## **ANNEXE 2**

### **MODÈLE DE PLANIFICATION D'UN RÉSEAU ET FICHIERS DE DONNÉES**

# 1) Problem statement

=====

/\*Declaration des produits\*/

enum tableaux = ...;

/\*Declaration de la demande par produit\*/

int dme[tableaux] = ...;

/\*Declaration des composants constituant le produit\*/

enum compo ...;

/\*Declaration des nomenclature par produit\*/

int nomen[compo,tableaux]= ...;

/\*Declaration des fournisseurs SP du reseau. NOEUD\*/

enum sp\_C = ...; /\*niveau 4\*/

enum sp\_G = ...; /\*niveau 3\*/

enum sp\_S = ...;

enum sp\_T = ...;

enum sp\_AS = ...; /\*niveau 2\*/

enum sp\_BS = ...;

enum sp\_AT = ...;

enum sp\_BT = ...;

enum sp\_B = ...; /\*niveau 1\*/

/\*Declaration des capacite des fournisseurs du reseau. NOEUD\*/

int cap\_C[sp\_C] = ...;

int cap\_G[sp\_G] = ...;

int cap\_S[sp\_S] = ...;

int cap\_T[sp\_T] = ...;

int cap\_AS[sp\_AS] = ...;

int cap\_BS[sp\_BS] = ...;

int cap\_AT[sp\_AT] = ...;

int cap\_BT[sp\_BT] = ...;

int cap\_B[sp\_B] = ...;

/\*Declaration des couts de transport entre fournisseurs. ARC\*/

```
float ctrans_G_C[sp_G,sp_C] = ...; /*entre niveaux 4 et 3*/
float ctrans_S_C[sp_S,sp_C] = ...;
float ctrans_T_C[sp_T,sp_C] = ...;
```

```
float ctrans_AS_S[sp_AS,sp_S] = ...; /*entre niveaux 3 et 2*/
float ctrans_AT_T[sp_AT,sp_T] = ...;
float ctrans_BS_S[sp_BS,sp_S] = ...;
float ctrans_BT_T[sp_BT,sp_T] = ...;
```

```
float ctrans_B_BS[sp_B,sp_BS] = ...; /*entre niveaux 2 et 1*/
float ctrans_B_BT[sp_B,sp_BT] = ...;
float ctrans_B_G [sp_B,sp_G ] = ...;
```

/\*Declaration des couts d'operation par fournisseur du resea. NOEUD\*/

```
float cope_C[sp_C] = ...;
```

```
float cope_G[sp_G] = ...;
float cope_S[sp_S] = ...;
float cope_T[sp_T] = ...;
```

```
float cope_AS[sp_AS] = ...;
float cope_AT[sp_AT] = ...;
float cope_BS[sp_BS] = ...;
float cope_BT[sp_BT] = ...;
```

```
float cope_B[sp_B] = ...;
```

/\*Declaration des couts d'inspection par fournisseur du reseau. NOEUD\*/

```
float cins_C[sp_C] = ...;
```

```
float cins_G[sp_G] = ...;
float cins_S[sp_S] = ...;
float cins_T[sp_T] = ...;
```

```
float cins_AS[sp_AS] = ...;
float cins_AT[sp_AT] = ...;
float cins_BS[sp_BS] = ...;
float cins_BT[sp_BT] = ...;
```

```
float cins_B[sp_B] = ...;
```

/\*Declaration des couts de non conformite non intercepter par fournisseur du reseau.  
NOEUD\*/

```

float cnon_C[sp_C] = ...;

float cnon_G[sp_G] = ...;
float cnon_S[sp_S] = ...;
float cnon_T[sp_T] = ...;

float cnon_AS[sp_AS] = ...;
float cnon_AT[sp_AT] = ...;
float cnon_BS[sp_BS] = ...;
float cnon_BT[sp_BT] = ...;

float cnon_B[sp_B] = ...;

/*Declaration des variables de flux par fournisseurs, par tableau. ARC*/

var float+ flux_G_C[sp_G,sp_C,tableaux];
var float+ flux_S_C[sp_S,sp_C,tableaux];
var float+ flux_T_C[sp_T,sp_C,tableaux];

var float+ flux_AS_S[sp_AS,sp_S,tableaux];
var float+ flux_AT_T[sp_AT,sp_T,tableaux];
var float+ flux_BS_S[sp_BS,sp_S,tableaux];
var float+ flux_BT_T[sp_BT,sp_T,tableaux];

var float+ flux_B_BS[sp_B,sp_BS,tableaux];
var float+ flux_B_BT[sp_B,sp_BT,tableaux];
var float+ flux_B_G [sp_B,sp_G ,tableaux];

/*Declaration des variables de charges par fournisseurs, par tableau. NOEUD*/

var float+ charge_C[sp_C,tableaux];

var float+ charge_G[sp_G,tableaux];
var float+ charge_S[sp_S,tableaux];
var float+ charge_T[sp_T,tableaux];

var float+ charge_AS[sp_AS,tableaux];
var float+ charge_AT[sp_AT,tableaux];
var float+ charge_BS[sp_BS,tableaux];
var float+ charge_BT[sp_BT,tableaux];

var float+ charge_B[sp_B,tableaux];

/*Fonction Objective: Minimiser les couts de transport POUR CHACUN DES
TABLEAUX*/

minimize
    sum(i in tableaux)(

```

```

/*Transport.Arc*/
sum(n in sp_C) (
  sum(m in sp_G) flux_G_C[m,n,i] * ctrans_G_C[m,n])+
sum(n in sp_C) (
  sum(m in sp_S) flux_S_C[m,n,i] * ctrans_S_C[m,n])+
sum(n in sp_C) (
  sum(m in sp_T) flux_T_C[m,n,i] * ctrans_T_C[m,n])+

sum(n in sp_G) (
  sum(m in sp_B) flux_B_G[m,n,i] * ctrans_B_G[m,n])+

sum(n in sp_S) (
  sum(m in sp_AS) flux_AS_S[m,n,i] * ctrans_AS_S[m,n])+
sum(n in sp_S) (
  sum(m in sp_BS) flux_BS_S[m,n,i] * ctrans_BS_S[m,n])+

sum(n in sp_T) (
  sum(m in sp_AT) flux_AT_T[m,n,i] * ctrans_AT_T[m,n])+
sum(n in sp_T) (
  sum(m in sp_BT) flux_BT_T[m,n,i] * ctrans_BT_T[m,n])+

sum(n in sp_BS) (
  sum(m in sp_B) flux_B_BS[m,n,i] * ctrans_B_BS[m,n])+

sum(n in sp_BT) (
  sum(m in sp_B) flux_B_BT[m,n,i] * ctrans_B_BT[m,n])+

/*Production. Inspection. Non Conformite.Noead*/
sum(n in sp_C) ((charge_C[n,i] * cope_C[n])+(charge_C[n,i] *
cins_C[n])+(charge_C[n,i] * cnon_C[n]))+

sum(n in sp_G) ((charge_G[n,i] * cope_G[n])+(charge_G[n,i] *
cins_G[n])+(charge_G[n,i] * cnon_G[n]))+
sum(n in sp_S) ((charge_S[n,i] * cope_S[n])+(charge_S[n,i] *
cins_S[n])+(charge_S[n,i] * cnon_S[n]))+
sum(n in sp_T) ((charge_T[n,i] * cope_T[n])+(charge_T[n,i] *
cins_T[n])+(charge_T[n,i] * cnon_T[n]))+

sum(n in sp_AS) ((charge_AS[n,i] * cope_AS[n])+(charge_AS[n,i] *
cins_AS[n])+(charge_AS[n,i] * cnon_AS[n]))+
sum(n in sp_AT) ((charge_AT[n,i] * cope_AT[n])+(charge_AT[n,i] *
cins_AT[n])+(charge_AT[n,i] * cnon_AT[n]))+
sum(n in sp_BS) ((charge_BS[n,i] * cope_BS[n])+(charge_BS[n,i] *
cins_BS[n])+(charge_BS[n,i] * cnon_BS[n]))+
sum(n in sp_BT) ((charge_BT[n,i] * cope_BT[n])+(charge_BT[n,i] *
cins_BT[n])+(charge_BT[n,i] * cnon_BT[n]))+

```



```

sum(n in sp_T) ((charge_T[n,i] * cope_T[n])+(charge_T[n,i] *
cins_T[n])+(charge_T[n,i] * cnon_T[n]))+

sum(n in sp_B) ((charge_B[n,i] * cope_B[n])+(charge_B[n,i] *
cins_B[n])+(charge_B[n,i] * cnon_B[n]))
)

/*contrainte*/

subject to {

/*Respect de la demande*/

forall(i in tableaux) sum(n in sp_C) charge_C[n,i] = dme[i];

/*Balancement des flux*/
/*SP_C et Ajout des nomenclatures*/
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_C)
    sum (m in sp_G) flux_G_C [m,n,i] = nomen[G,i] * charge_C[n,i];
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_C)
    sum (m in sp_S) flux_S_C [m,n,i] = nomen[S,i] * charge_C[n,i];
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_C)
    sum (m in sp_T) flux_T_C [m,n,i] = nomen[T,i] * charge_C[n,i];

/*SP_G*/
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_G)
    sum (m in sp_B) flux_B_G[m,n,i] = charge_G[n,i];

forall (i in tableaux)
  forall (m in sp_G)
    sum (n in sp_C) flux_G_C[m,n,i] = charge_G[m,i];

/*SP_S*/
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_S )
    sum (m in sp_AS) flux_AS_S[m,n,i] = charge_S[n,i];

forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_S )
    sum (m in sp_BS) flux_BS_S[m,n,i] = charge_S[n,i];

forall (i in tableaux)

```

```

forall (m in sp_S)
  sum (n in sp_C) flux_S_C [m,n,i] = charge_S[m,i];

/*SP_T*/
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_T )
    sum (m in sp_BT) flux_BT_T [m,n,i] = charge_T[n,i];

forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_T )
    sum (m in sp_AT) flux_AT_T [m,n,i] = charge_T[n,i];

forall (i in tableaux)
  forall (m in sp_T)
    sum (n in sp_C) flux_T_C [m,n,i] = charge_T[m,i];

/*SP_AS*/
forall (i in tableaux)
  forall (m in sp_AS)
    sum (n in sp_S ) flux_AS_S[m,n,i] = charge_AS[m,i];

/*SP_AT*/
forall(i in tableaux)
  forall (m in sp_AT)
    sum (n in sp_T ) flux_AT_T[m,n,i] = charge_AT[m,i];

/*SP_BS*/
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_BS)
    sum (m in sp_B) flux_B_BS[m,n,i] = charge_BS[n,i];

forall (i in tableaux)
  forall (m in sp_BS)
    sum (n in sp_S) flux_BS_S[m,n,i] = charge_BS[m,i];

/*SP_BT*/
forall (i in tableaux)
  forall (n in sp_BT)
    sum (m in sp_B) flux_B_BT[m,n,i] = charge_BT[n,i];

forall (i in tableaux)
  forall (m in sp_BT)
    sum (n in sp_T) flux_BT_T[m,n,i] = charge_BT[m,i];

/*SP_B*/
forall(i in tableaux)
  forall(m in sp_B)
    sum(n in sp_BT) flux_B_BT[m,n,i] +

```

```

sum(o in sp_BS) flux_B_BS[m,o,i] +
sum(p in sp_G ) flux_B_G [m,p,i] = charge_B[m,i];

/*Limite des capacite*/
forall(n in sp_C)
    sum(i in tableaux) charge_C[n,i] <= cap_C[n];

forall(n in sp_G)
    sum(i in tableaux) charge_G[n,i] <= cap_G[n];
forall(n in sp_S)
    sum(i in tableaux) charge_S[n,i] <= cap_S[n];
forall(n in sp_T)
    sum(i in tableaux) charge_T[n,i] <= cap_T[n];

forall(n in sp_AS)
    sum(i in tableaux) charge_AS[n,i] <= cap_AS[n];
forall(n in sp_AT)
    sum(i in tableaux) charge_AT[n,i] <= cap_AT[n];
forall(n in sp_BS)
    sum(i in tableaux) charge_BS[n,i] <= cap_BS[n];
forall(n in sp_BT)
    sum(i in tableaux) charge_BT[n,i] <= cap_BT[n];

forall(n in sp_B)
    sum(i in tableaux) charge_B[n,i] <= cap_B[n];

};

data 23315480 "OPLStudio\040715 Model, donne result\040715 Donnees flux_charge
complet.dat"

/*Scenario: AOQL 1%, LTPD 3.4%, Risque client 10%

/*Enumeration des type de produits fabriqués*/
tableaux = {tableaux_A,tableaux_B,tableaux_C,tableaux_D,tableaux_E,tableaux_F};

/*Enumeration de la demande de chaque produit*/
dme   = [1000,3000,5000,7000,3000,5000];

/*Enumeration des composants G, S et T*/
compo = {G,S,T};

```

/\*Enumeration des nomenclature pour chaque produit \*/

```
nomen = [[2,1,2,1,1,2],
          [0,0,1,1,1,1],
          [1,1,1,0,1,0]];
```

/\*Enumeration des fournisseurs SP du reseau. NOEUD\*/

```
sp_C = {C1,C2,C3,C4,C5,C6};
```

```
sp_G = {G1,G2,G3,G4,G5};
```

```
sp_S = {S1,S2,S3,S4,S5};
```

```
sp_T = {T1,T2,T3,T4};
```

```
sp_AS = {AS1,AS2};
```

```
sp_BS = {BS};
```

```
sp_AT = {AT1,AT2};
```

```
sp_BT = {BT};
```

```
sp_B = {B1,B2,B3,B4,B5,B6};
```

/\* capacité unitaire des fournisseurs. NOEUD\*/

```
cap_C = [ 9000, 2000, 4000, 5000, 25000, 3000];
```

```
cap_G = [12000, 6000, 13000, 25000, 9000];
```

```
cap_S = [ 5000, 3000, 4000, 6000, 7000];
```

```
cap_T = [ 3000, 8000, 19000, 4000];
```

```
cap_AS = [12000, 12000];
```

```
cap_AT = [7000, 7000];
```

```
cap_BS = [29000];
```

```
cap_BT = [42000];
```

```
cap_B = [16000, 9000, 3000, 30000, 7000, 8000];
```

/\* coût de transport entre les processeurs de chaque niveau. ARC\*/

```
ctrans_G_C = [[0.0500, 0.0250, 0.0375, 0.0625, 0.0875, 0.1125],
               [0.0875, 0.0625, 0.0375, 0.0250, 0.0500, 0.0750],
               [0.1312, 0.1062, 0.0812, 0.0562, 0.0312, 0.0356],
               [0.1687, 0.1437, 0.1187, 0.0937, 0.0687, 0.0437],
               [0.2125, 0.1875, 0.1625, 0.1375, 0.1125, 0.0880]];
```

```
ctrans_S_C = [[0.0562, 0.0378, 0.0456, 0.0562, 0.0812, 0.0875],
               [0.0937, 0.0687, 0.0434, 0.0187, 0.0437, 0.0665],
               [0.1250, 0.1050, 0.0572, 0.0600, 0.0250, 0.0375],
               [0.1750, 0.1500, 0.1250, 0.1000, 0.0750, 0.0580],
               [0.2065, 0.1812, 0.1592, 0.1213, 0.1062, 0.0812]];
```

```
ctrans_T_C = [[0.0687, 0.0437, 0.0187, 0.0256, 0.4375, 0.0687],
               [0.0876, 0.0600, 0.0250, 0.0375, 0.0625, 0.0875],
               [0.1875, 0.1625, 0.1375, 0.1125, 0.0875, 0.0625],
               [0.1937, 0.1687, 0.1437, 0.1180, 0.0933, 0.0686]];
```

```
ctrans_AS_S = [[0.1531, 0.1156, 0.0843, 0.0343, 0.0281],
               [0.0343, 0.0281, 0.0593, 0.1093, 0.1406]];
```

```
ctrans_BS_S = [[0.1000, 0.0625, 0.0312, 0.0562, 0.0875]];
```

```
ctrans_AT_T = [[0.1156, 0.1093, 0.0281, 0.0343],
               [0.0281, 0.0343, 0.1468, 0.1531]];
```

```
ctrans_BT_T = [[0.0687, 0.0625, 0.0875, 0.0937]];
```

```
ctrans_B_BS = [[0.1062],
               [0.1000],
               [0.0312],
               [0.0250],
               [0.0187],
               [0.0250]];
```

```
ctrans_B_BT = [[0.0875],
               [0.0812],
               [0.0125],
               [0.0062],
               [0.0375],
               [0.0437]];
```

```
ctrans_B_G = [[0.0250, 0.0625, 0.1062, 0.1437, 0.1875],
               [0.0187, 0.0562, 0.1000, 0.1375, 0.1812],
               [0.0625, 0.0250, 0.0312, 0.0687, 0.1125],
               [0.0687, 0.0312, 0.0250, 0.0625, 0.1062],
               [0.1000, 0.0625, 0.0187, 0.0312, 0.0750],
               [0.1062, 0.0687, 0.0250, 0.0250, 0.0687]];
```

/\* coût d'opération a chacun des fournisseurs. NOEUD\*/

```
cope_C      = [21.09, 24.14, 22.06, 26.03, 25.15, 23.28];
```

```
cope_G      = [10.31, 10.43, 10.77, 10.91, 10.29];
```

```
cope_S      = [19.12, 18.61, 20.34, 18.76, 20.59];
```

```
cope_T      = [22.10, 22.46, 21.54, 23.69];
```

```

cope_AS      = [ 10.37, 10.42];
cope_AT      = [11.96, 11.83];
cope_BS      = [ 2.35];
cope_BT      = [ 2.05];

cope_B       = [ 7.14, 6.40, 7.03, 6.43, 6.27, 7.07];

/* coût d'inspection a chacun des processeurs n */

cins_C       = [5.0000, 4.9887, 5.0000, 1.3426, 4.6028, 4.9996];

cins_G       = [3.4526, 3.4988, 3.2392, 3.0626, 3.4574];
cins_S       = [2.4984, 1.4373, 2.4798, 2.4533, 2.4662];
cins_T       = [2.9940, 2.9883, 2.9980, 2.8942];

cins_AS      = [0.4986, 0.4039];
cins_AT      = [1.2642, 1.4786];
cins_BS      = [1.9977];
cins_BT      = [1.2578];

cins_B       = [0.1924, 1.4475, 0.3849, 1.4392, 1.4769, 0.2930];

/* coût de non-conformité non interceptée a chacun des processeurs n */

cnon_C       = [0.0000, 0.0245, 0.0000, 1.1248, 0.4704, 0.0012];

cnon_G       = [0.0172, 0.0006, 0.0687, 0.1004, 0.0157];
cnon_S       = [0.0027, 0.4483, 0.0256, 0.0523, 0.0398];
cnon_T       = [0.0081, 0.0147, 0.0031, 0.0977];

cnon_AS      = [0.0025, 0.0785];
cnon_AT      = [0.1260, 0.1063];
cnon_BS      = [0.0022];
cnon_BT      = [0.1984];

};

```

### **ANNEXE 3**

#### **DONNÉES RELATIVES À LA QUALITÉ POUR LES TROIS SCÉNARIOS**

## Scénario 1 : Coûts de qualité pour un contrôle a 100%

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4	
AS, AT, B		BS, BT		S, G, T		C	
AOQL	100%	AOQL	100%	AOQL	100%	AOQL	100%
n	1000	n	1000	n	1000	n	1000
c	0	c	0	c	0	c	0

## Niveau 1

## AS, AT, B

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>B</b>									
1	0,36%	*	3%	0,01%	\$ 1,50	1,5000	7,15	7,15	0,0007
2	0,55%	*	0%	0,00%	\$ 1,50	1,5000	6,41	6,41	0,0001
3	0,11%	*	32%	0,04%	\$ 1,50	1,5000	7,04	7,04	0,0026
4	0,53%	*	0%	0,00%	\$ 1,50	1,5000	6,43	6,43	0,0002
5	0,64%	*	0%	0,00%	\$ 1,50	1,5000	6,28	6,28	0,0001
6	0,09%	*	42%	0,04%	\$ 1,50	1,5000	7,08	7,08	0,0026
			<b>Moyen</b>	<b>0,01%</b>	\$ 1,50	\$ 1,50	\$ 6,73	\$ 6,73	\$ 0,00
<b>AS</b>									
1	0,82%	*	0%	0,00%	\$ 0,50	0,5000	9,37	9,37	0,0000
2	0,35%	*	3%	0,01%	\$ 0,50	0,5000	10,43	10,43	0,0011
			<b>Moyen</b>	<b>0,01%</b>	\$ 0,50	\$ 0,50	\$ 9,90	\$ 9,90	\$ 0,00
<b>AT</b>									
1	0,25%	*	8%	0,02%	\$ 2,00	2,0000	11,97	11,97	0,0024
2	0,30%	*	5%	0,01%	\$ 2,00	2,0000	11,84	11,84	0,0017
			<b>Moyen</b>	<b>0,02%</b>	\$ 2,00	\$ 2,00	\$ 11,90	\$ 11,90	\$ 0,00

## Niveau 2

## BS, BT

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>BS</b>									
1	0,87%	0,89%	0%	0,00%	\$ 2,00	2,0000	19,08	19,08	0,000
<b>BT</b>									
1	0,21%	0,22%	11%	0,02%	\$ 2,00	2,0000	18,78	18,78	0,005
<b>G</b>									
1	0,61%	0,63%	0%	0,00%	\$ 3,50	3,5000	17,05	17,05	0,0002
2	0,99%	1,00%	0%	0,00%	\$ 3,50	3,5000	16,16	16,16	0,0000
3	0,42%	0,44%	1%	0,01%	\$ 3,50	3,5000	17,50	17,50	0,0010
4	0,36%	0,37%	2%	0,01%	\$ 3,50	3,5000	17,65	17,65	0,0016
5	0,62%	0,64%	0%	0,00%	\$ 3,50	3,5000	17,02	17,02	0,0002
			<b>Moyen</b>	<b>0,00%</b>	\$ 3,50	\$ 3,50	\$ 17,08	\$ 17,08	\$ 0,00



## Niveau 3

S, G, T

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>S</b>									
1	0,93%	0,94%	0%	0,00%	\$ 2,50	2,5000	38,10	38,10	0,0000
2	0,19%	0,19%	14%	0,03%	\$ 2,50	2,5000	40,59	40,59	0,0113
3	0,67%	0,68%	0%	0,00%	\$ 2,50	2,5000	39,32	39,32	0,0003
4	0,58%	0,59%	0%	0,00%	\$ 2,50	2,5000	39,75	39,75	0,0007
5	0,62%	0,62%	0%	0,00%	\$ 2,50	2,5000	39,58	39,58	0,0005
			<b>Moyen</b>	<b>0,01%</b>	<b>\$ 2,50</b>	<b>\$ 2,50</b>	<b>\$ 39,47</b>	<b>\$ 39,47</b>	<b>\$ 0,00</b>
<b>T</b>									
1	0,67%	0,71%	0%	0,00%	\$ 3,00	3,0000	41,79	41,79	0,0003
2	0,59%	0,64%	0%	0,00%	\$ 3,00	3,0000	42,15	42,15	0,0005
3	0,78%	0,82%	0%	0,00%	\$ 3,00	3,0000	42,23	42,23	0,0001
4	0,35%	0,40%	2%	0,01%	\$ 3,00	3,0000	44,37	44,37	0,0033
			<b>Moyen</b>	<b>0,00%</b>	<b>\$ 3,00</b>	<b>\$ 3,00</b>	<b>\$ 42,63</b>	<b>\$ 42,63</b>	<b>\$ 0,00</b>

## Niveau 4

C

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>C</b>									
1	0,96%	1,94%	0%	0,00%	\$ 5,00	5,0000	110,27	110,27	0,0000
2	0,37%	0,77%	0%	0,00%	\$ 5,00	5,0000	113,32	113,32	0,0004
3	0,77%	1,57%	0%	0,00%	\$ 5,00	5,0000	110,25	110,25	0,0000
4	0,01%	0,04%	64%	0,03%	\$ 5,00	5,0000	115,22	115,22	0,0329
5	0,18%	0,38%	2%	0,01%	\$ 5,00	5,0000	114,33	114,33	0,0094
6	0,54%	1,10%	0%	0,00%	\$ 5,00	5,0000	112,37	112,37	0,0000
			<b>Moyen</b>	<b>0,01%</b>	<b>\$ 5,00</b>	<b>\$ 5,00</b>	<b>\$ 112,63</b>	<b>\$ 112,63</b>	<b>\$ 0,01</b>

## Scénario 2 : Coûts de qualité pour un contrôle avec un AOQL de 1 %

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4	
AS, AT, B		BS, BT		S, G, T		C	
AOQL	1%	AOQL	1%	AOQL	1%	AOQL	1%
n	120	n	120	n	120	n	120
c	2	c	2	c	2	c	2

## Niveau 1

## AS, AT, B

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>B</b>									
1	0,36%	*	99%	0,35%	\$ 1,50	0,1024	7,15	7,15	0,0252
2	0,55%	*	97%	0,53%	\$ 1,50	0,2190	6,41	6,41	0,0342
3	0,11%	*	100%	0,11%	\$ 1,50	0,1808	7,04	7,04	0,0079
4	0,53%	*	97%	0,52%	\$ 1,50	0,2161	6,43	6,43	0,0334
5	0,64%	*	96%	0,61%	\$ 1,50	0,2368	6,28	6,28	0,0385
6	0,09%	*	100%	0,09%	\$ 1,50	0,1802	7,08	7,08	0,0061
			<b>Moyen</b>	<b>0,37%</b>	\$ 1,50	\$ 0,20	\$ 6,73	\$ 6,73	\$ 0,02
<b>AS</b>									
1	0,82%	*	92%	0,75%	\$ 0,50	0,0937	9,37	9,37	0,0707
2	0,35%	*	99%	0,34%	\$ 0,50	0,0638	10,43	10,43	0,0357
			<b>Moyen</b>	<b>0,55%</b>	\$ 0,50	\$ 0,08	\$ 9,90	\$ 9,90	\$ 0,05
<b>AT</b>									
1	0,25%	*	100%	0,25%	\$ 2,00	0,2465	11,97	11,97	0,0300
2	0,30%	*	99%	0,30%	\$ 2,00	0,2508	11,84	11,84	0,0387
			<b>Moyen</b>	<b>0,28%</b>	\$ 2,00	\$ 0,25	\$ 11,90	\$ 11,90	\$ 0,03

## Niveau 2

## BS, BT

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>BS</b>									
1	0,87%	1,24%	81%	1,01%	\$ 2,00	0,5694	19,08	19,08	0,192
<b>BT</b>									
1	0,21%	0,58%	97%	0,56%	\$ 2,00	0,2982	18,78	18,78	0,105
<b>G</b>									
1	0,61%	0,98%	88%	0,87%	\$ 3,50	0,7755	17,05	17,05	0,1478
2	0,99%	1,35%	78%	1,05%	\$ 3,50	1,1078	16,16	16,16	0,1701
3	0,42%	0,79%	93%	0,73%	\$ 3,50	0,6379	17,50	17,50	0,1283
4	0,36%	0,73%	94%	0,68%	\$ 3,50	0,5992	17,65	17,65	0,1207
5	0,62%	0,99%	88%	0,87%	\$ 3,50	0,7845	17,02	17,02	0,1488
			<b>Moyen</b>	<b>0,84%</b>	\$ 3,50	\$ 0,78	\$ 17,08	\$ 17,08	\$ 0,14

## Niveau 3

S, G, T

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>S</b>									
1	0,93%	2,46%	43%	1,07%	\$ 2,50	1,5474	38,10	38,10	0,4065
2	0,19%	1,73%	65%	1,14%	\$ 2,50	1,0595	40,59	40,59	0,4609
3	0,67%	2,21%	51%	1,12%	\$ 2,50	1,3878	39,32	39,32	0,4393
4	0,58%	2,12%	53%	1,13%	\$ 2,50	1,3289	39,75	39,75	0,4487
5	0,62%	2,16%	52%	1,12%	\$ 2,50	1,3520	39,58	39,58	0,4452
			<b>Moyen</b>	<b>1,11%</b>	<b>\$ 2,50</b>	<b>\$ 1,34</b>	<b>\$ 39,47</b>	<b>\$ 39,47</b>	<b>\$ 0,44</b>
<b>T</b>									
1	0,67%	1,49%	73%	1,09%	\$ 3,00	1,0637	41,79	41,79	0,4570
2	0,59%	1,42%	76%	1,07%	\$ 3,00	1,0047	42,15	42,15	0,4527
3	0,78%	1,60%	70%	1,12%	\$ 3,00	1,1565	42,23	42,23	0,4718
4	0,35%	1,18%	83%	0,98%	\$ 3,00	0,8122	44,37	44,37	0,4351
			<b>Moyen</b>	<b>1,07%</b>	<b>\$ 3,00</b>	<b>\$ 1,01</b>	<b>\$ 42,63</b>	<b>\$ 42,63</b>	<b>\$ 0,45</b>

## Niveau 4

C

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>C</b>									
1	0,96%	7,06%	1%	0,07%	\$ 5,00	4,9584	110,27	110,27	0,0736
2	0,37%	5,91%	3%	0,16%	\$ 5,00	4,8786	113,32	113,32	0,1848
3	0,77%	6,70%	1%	0,09%	\$ 5,00	4,9411	110,25	110,25	0,0988
4	0,01%	5,20%	5%	0,27%	\$ 5,00	4,7704	115,22	115,22	0,3125
5	0,18%	5,53%	4%	0,21%	\$ 5,00	4,8291	114,33	114,33	0,2457
6	0,54%	6,24%	2%	0,13%	\$ 5,00	4,9097	112,37	112,37	0,1438
			<b>Moyen</b>	<b>0,16%</b>	<b>\$ 5,00</b>	<b>\$ 4,88</b>	<b>\$ 112,63</b>	<b>\$ 112,63</b>	<b>\$ 0,18</b>

## Scénario 3 : Coûts de qualité pour un contrôle avec un AOQL par niveau

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3		Niveau 4	
AS, AT, B		BS, BT		S, G, T		C	
AOQL	1,5%	AOQL	3%	AOQL	3%	AOQL	1,5%
n	85	n	44	n	44	n	85
c	2	c	2	c	2	c	2

## Niveau 1

## AS, AT, B

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>B</b>									
1	0,36%	*	100%	0,35%	\$ 1,50	0,1325	7,15	7,15	0,0253
2	0,55%	*	99%	0,54%	\$ 1,50	0,1441	6,41	6,41	0,0348
3	0,11%	*	100%	0,11%	\$ 1,50	0,1277	7,04	7,04	0,0079
4	0,53%	*	99%	0,53%	\$ 1,50	0,1428	6,43	6,43	0,0340
5	0,64%	*	98%	0,63%	\$ 1,50	0,1522	6,28	6,28	0,0395
6	0,09%	*	100%	0,09%	\$ 1,50	0,1276	7,08	7,08	0,0061
			<b>Moyen</b>	<b>0,38%</b>	\$ 1,50	\$ 0,14	\$ 6,73	\$ 6,73	\$ 0,02
<b>AS</b>									
1	0,82%	*	97%	0,79%	\$ 0,50	0,0578	9,37	9,37	0,0740
2	0,35%	*	100%	0,34%	\$ 0,50	0,0440	10,43	10,43	0,0359
			<b>Moyen</b>	<b>0,57%</b>	\$ 0,50	\$ 0,05	\$ 9,90	\$ 9,90	\$ 0,05
<b>AT</b>									
1	0,25%	*	100%	0,25%	\$ 2,00	0,1728	11,97	11,97	0,0301
2	0,30%	*	100%	0,30%	\$ 2,00	0,1743	11,84	11,84	0,0358
			<b>Moyen</b>	<b>0,28%</b>	\$ 2,00	\$ 0,17	\$ 11,90	\$ 11,90	\$ 0,03

## Niveau 2

## BS, BT

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*I/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>BS</b>									
1	0,87%	1,24%	98%	1,22%	\$ 2,00	0,1228	19,08	19,08	0,233
<b>BT</b>									
1	0,21%	0,58%	100%	0,58%	\$ 2,00	0,0924	18,78	18,78	0,109
<b>G</b>									
1	0,61%	0,99%	99%	0,98%	\$ 3,50	0,1870	17,05	17,05	0,1665
2	0,99%	1,36%	98%	1,33%	\$ 3,50	0,2309	16,16	16,16	0,2149
3	0,42%	0,79%	99%	0,79%	\$ 3,50	0,1724	17,50	17,50	0,1383
4	0,36%	0,73%	100%	0,73%	\$ 3,50	0,1687	17,65	17,65	0,1286
5	0,62%	1,00%	99%	0,99%	\$ 3,50	0,1881	17,02	17,02	0,1681
			<b>Moyen</b>	<b>0,96%</b>	\$ 3,50	\$ 0,19	\$ 17,08	\$ 17,08	\$ 0,16

## Niveau 3

S, G, T

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>S</b>									
1	0,93%	2,69%	88%	2,38%	\$ 2,50	0,3904	38,10	38,10	0,9059
2	0,19%	1,97%	94%	1,85%	\$ 2,50	0,2467	40,59	40,59	0,7523
3	0,67%	2,44%	91%	2,21%	\$ 2,50	0,3355	39,32	39,32	0,8690
4	0,58%	2,35%	91%	2,15%	\$ 2,50	0,3175	39,75	39,75	0,8536
5	0,62%	2,39%	91%	2,17%	\$ 2,50	0,3244	39,58	39,58	0,8598
			<b>Moyen</b>	<b>2,15%</b>	<b>\$ 2,50</b>	<b>\$ 0,32</b>	<b>\$ 39,47</b>	<b>\$ 39,47</b>	<b>\$ 0,85</b>
<b>T</b>									
1	0,67%	1,52%	97%	1,47%	\$ 3,00	0,2187	41,79	41,79	0,6142
2	0,59%	1,45%	97%	1,41%	\$ 3,00	0,2089	42,15	42,15	0,5929
3	0,78%	1,62%	96%	1,57%	\$ 3,00	0,2351	42,23	42,23	0,6613
4	0,35%	1,21%	98%	1,19%	\$ 3,00	0,1804	44,37	44,37	0,5268
			<b>Moyen</b>	<b>1,41%</b>	<b>\$ 3,00</b>	<b>\$ 0,21</b>	<b>\$ 42,63</b>	<b>\$ 42,63</b>	<b>\$ 0,60</b>

## Niveau 4

C

ST	P	PUAOQL	Pa	AOQ	Ci	Ci*/1000	Cp cumul	Cd	Cd*D/1000
<b>C</b>									
1	0,96%	9,89%	1%	0,10%	\$ 5,00	4,9544	110,27	110,27	0,1088
2	0,37%	8,75%	2%	0,19%	\$ 5,00	4,9028	113,32	113,32	0,2107
3	0,77%	9,53%	1%	0,12%	\$ 5,00	4,9418	110,25	110,25	0,1337
4	0,01%	8,04%	3%	0,27%	\$ 5,00	4,8465	115,22	115,22	0,3109
5	0,18%	8,37%	3%	0,23%	\$ 5,00	4,8759	114,33	114,33	0,2597
6	0,54%	9,07%	2%	0,16%	\$ 5,00	4,9212	112,37	112,37	0,1756
			<b>Moyen</b>	<b>0,18%</b>	<b>\$ 5,00</b>	<b>\$ 4,91</b>	<b>\$ 112,63</b>	<b>\$ 112,63</b>	<b>\$ 0,20</b>

## **ANNEXE 4**

### **RÉSULTATS DU MODÈLE AGRÉGÉ POUR LES TROIS SCÉNARIOS**

# 1) Results: Plan de planification d'un réseau avec un contrôle de la qualité caractérisé par un AOQL de 1%

=====

Optimal Solution with Objective Value: 3190072.4000

```
flux_G_C[G1,C1,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G1,C1,tableaux_B] = 2000.0000
flux_G_C[G1,C1,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G1,C1,tableaux_D] = 7000.0000
flux_G_C[G1,C1,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G1,C1,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G1,C2,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G1,C2,tableaux_B] = 1000.0000
flux_G_C[G1,C2,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G1,C2,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G1,C2,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G1,C2,tableaux_F] = 2000.0000
flux_G_C[G1,C3,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G1,C3,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G1,C3,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G1,C3,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G1,C3,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G1,C3,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G1,C4,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G1,C4,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G1,C4,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G1,C4,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G1,C4,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G1,C4,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G1,C5,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G1,C5,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G1,C5,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G1,C5,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G1,C5,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G1,C5,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G1,C6,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G1,C6,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G1,C6,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G1,C6,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G1,C6,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G1,C6,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G2,C1,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G2,C1,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G2,C1,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G2,C1,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G2,C1,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G2,C1,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G2,C2,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G2,C2,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G2,C2,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G2,C2,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G2,C2,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G2,C2,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G2,C3,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G2,C3,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G2,C3,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G2,C3,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G2,C3,tableaux_E] = 1000.0000
flux_G_C[G2,C3,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G2,C4,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G2,C4,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G2,C4,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G2,C4,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G2,C4,tableaux_E] = 0.0000
```

```
flux_G_C[G2,C4,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G2,C5,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G2,C5,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G2,C5,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G2,C5,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G2,C5,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G2,C5,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G2,C6,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G2,C6,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G2,C6,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G2,C6,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G2,C6,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G2,C6,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G3,C1,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G3,C1,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G3,C1,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G3,C1,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G3,C1,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G3,C1,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G3,C2,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G3,C2,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G3,C2,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G3,C2,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G3,C2,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G3,C2,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G3,C3,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G3,C3,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G3,C3,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G3,C3,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G3,C3,tableaux_E] = 1500.0000
flux_G_C[G3,C3,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G3,C4,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G3,C4,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G3,C4,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G3,C4,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G3,C4,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G3,C4,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G3,C5,tableaux_A] = 2000.0000
flux_G_C[G3,C5,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G3,C5,tableaux_C] = 4000.0000
flux_G_C[G3,C5,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G3,C5,tableaux_E] = 500.0000
flux_G_C[G3,C5,tableaux_F] = 5000.0000
flux_G_C[G3,C6,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G3,C6,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G3,C6,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G3,C6,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G3,C6,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G3,C6,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G4,C1,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G4,C1,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G4,C1,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G4,C1,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G4,C1,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G4,C1,tableaux_F] = 0.0000
flux_G_C[G4,C2,tableaux_A] = 0.0000
flux_G_C[G4,C2,tableaux_B] = 0.0000
flux_G_C[G4,C2,tableaux_C] = 0.0000
flux_G_C[G4,C2,tableaux_D] = 0.0000
flux_G_C[G4,C2,tableaux_E] = 0.0000
flux_G_C[G4,C2,tableaux_F] = 0.0000
```

[illegible]







[illegible]





```

flux_B_G[B6,G3,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_F] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_C] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_F] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_C] = 6000.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_F] = 2000.0000

```

```

charge_C[C1,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_B] = 2000.0000
charge_C[C1,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_D] = 7000.0000
charge_C[C1,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_F] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_B] = 1000.0000
charge_C[C2,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_F] = 1000.0000
charge_C[C3,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_E] = 2500.0000
charge_C[C3,tableaux_F] = 1500.0000
charge_C[C4,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_F] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_A] = 1000.0000
charge_C[C5,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_C[C5,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_E] = 500.0000
charge_C[C5,tableaux_F] = 2500.0000
charge_C[C6,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_C] = 3000.0000
charge_C[C6,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_G[G1,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_G[G1,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_D] = 7000.0000
charge_G[G1,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_F] = 2000.0000
charge_G[G2,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_E] = 1000.0000
charge_G[G2,tableaux_F] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_A] = 2000.0000

```

```

charge_G[G3,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_C] = 4000.0000
charge_G[G3,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_E] = 2000.0000
charge_G[G3,tableaux_F] = 5000.0000
charge_G[G4,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_F] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_C] = 6000.0000
charge_G[G5,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_F] = 3000.0000

```

```

charge_S[S1,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_D] = 5000.0000
charge_S[S1,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_F] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_D] = 2000.0000
charge_S[S2,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_F] = 1000.0000
charge_S[S3,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_E] = 2500.0000
charge_S[S3,tableaux_F] = 1500.0000
charge_S[S4,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_C] = 3000.0000
charge_S[S4,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_E] = 500.0000
charge_S[S4,tableaux_F] = 2500.0000
charge_S[S5,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_S[S5,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_T[T1,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T3,tableaux_A] = 1000.0000
charge_T[T3,tableaux_B] = 3000.0000
charge_T[T3,tableaux_C] = 5000.0000
charge_T[T3,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T3,tableaux_E] = 3000.0000

```

charge\_T[T3,tableaux\_F] = 0.0000  
 charge\_T[T4,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_T[T4,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_T[T4,tableaux\_C] = 0.0000  
 charge\_T[T4,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_T[T4,tableaux\_E] = 0.0000  
 charge\_T[T4,tableaux\_F] = 0.0000

charge\_AS[AS1,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_AS[AS1,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_AS[AS1,tableaux\_C] = 5000.0000  
 charge\_AS[AS1,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_AS[AS1,tableaux\_E] = 500.0000  
 charge\_AS[AS1,tableaux\_F] = 2500.0000  
 charge\_AS[AS2,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_AS[AS2,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_AS[AS2,tableaux\_C] = 0.0000  
 charge\_AS[AS2,tableaux\_D] = 7000.0000  
 charge\_AS[AS2,tableaux\_E] = 2500.0000  
 charge\_AS[AS2,tableaux\_F] = 2500.0000

charge\_AT[AT1,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_AT[AT1,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_AT[AT1,tableaux\_C] = 5000.0000  
 charge\_AT[AT1,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_AT[AT1,tableaux\_E] = 2000.0000  
 charge\_AT[AT1,tableaux\_F] = 0.0000  
 charge\_AT[AT2,tableaux\_A] = 1000.0000  
 charge\_AT[AT2,tableaux\_B] = 3000.0000  
 charge\_AT[AT2,tableaux\_C] = 0.0000  
 charge\_AT[AT2,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_AT[AT2,tableaux\_E] = 1000.0000  
 charge\_AT[AT2,tableaux\_F] = 0.0000

charge\_BS[BS,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_BS[BS,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_BS[BS,tableaux\_C] = 5000.0000  
 charge\_BS[BS,tableaux\_D] = 7000.0000  
 charge\_BS[BS,tableaux\_E] = 3000.0000  
 charge\_BS[BS,tableaux\_F] = 5000.0000

charge\_BT[BT,tableaux\_A] = 1000.0000  
 charge\_BT[BT,tableaux\_B] = 3000.0000

charge\_BT[BT,tableaux\_C] = 5000.0000  
 charge\_BT[BT,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_BT[BT,tableaux\_E] = 3000.0000  
 charge\_BT[BT,tableaux\_F] = 0.0000

charge\_B[B1,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_B[B1,tableaux\_B] = 3000.0000  
 charge\_B[B1,tableaux\_C] = 4000.0000  
 charge\_B[B1,tableaux\_D] = 1000.0000  
 charge\_B[B1,tableaux\_E] = 2000.0000  
 charge\_B[B1,tableaux\_F] = 0.0000  
 charge\_B[B2,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_B[B2,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_B[B2,tableaux\_C] = 0.0000  
 charge\_B[B2,tableaux\_D] = 7000.0000  
 charge\_B[B2,tableaux\_E] = 0.0000  
 charge\_B[B2,tableaux\_F] = 2000.0000  
 charge\_B[B3,tableaux\_A] = 2000.0000  
 charge\_B[B3,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_B[B3,tableaux\_C] = 1000.0000  
 charge\_B[B3,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_B[B3,tableaux\_E] = 0.0000  
 charge\_B[B3,tableaux\_F] = 0.0000  
 charge\_B[B4,tableaux\_A] = 1000.0000  
 charge\_B[B4,tableaux\_B] = 3000.0000  
 charge\_B[B4,tableaux\_C] = 9000.0000  
 charge\_B[B4,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_B[B4,tableaux\_E] = 7000.0000  
 charge\_B[B4,tableaux\_F] = 10000.0000  
 charge\_B[B5,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_B[B5,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_B[B5,tableaux\_C] = 0.0000  
 charge\_B[B5,tableaux\_D] = 6000.0000  
 charge\_B[B5,tableaux\_E] = 0.0000  
 charge\_B[B5,tableaux\_F] = 1000.0000  
 charge\_B[B6,tableaux\_A] = 0.0000  
 charge\_B[B6,tableaux\_B] = 0.0000  
 charge\_B[B6,tableaux\_C] = 6000.0000  
 charge\_B[B6,tableaux\_D] = 0.0000  
 charge\_B[B6,tableaux\_E] = 0.0000  
 charge\_B[B6,tableaux\_F] = 2000.0000

2) Results: Plan de planification d'un réseau avec un contrôle de la qualité caractérisé par un inspection à 100%.

=====

Optimal Solution with Objective Value: 3255375.3000

flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_B] = 3000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_D] = 6000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_D] = 1000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_F] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_F] = 6000.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_D] = 0.0000

flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_E] = 1000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_A] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_C] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_E] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_F] = 1000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C2,tableaux\_C] = 0.0000









[illegible]





```

flux_B_G[B6,G3,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_C] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_F] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_C] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_F] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_C] = 8000.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_C[C1,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_C[C1,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_D] = 6000.0000
charge_C[C1,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_F] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_D] = 1000.0000
charge_C[C2,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_F] = 1000.0000
charge_C[C3,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_E] = 1000.0000
charge_C[C3,tableaux_F] = 3000.0000
charge_C[C4,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_F] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_A] = 1000.0000
charge_C[C5,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_C[C5,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_E] = 2000.0000
charge_C[C5,tableaux_F] = 1000.0000
charge_C[C6,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_C] = 3000.0000
charge_C[C6,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_G[G1,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_G[G1,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_D] = 7000.0000
charge_G[G1,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_F] = 2000.0000
charge_G[G2,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_D] = 0.0000

```

```

charge_G[G2,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_F] = 6000.0000
charge_G[G3,tableaux_A] = 2000.0000
charge_G[G3,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_C] = 2000.0000
charge_G[G3,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_E] = 3000.0000
charge_G[G3,tableaux_F] = 1000.0000
charge_G[G4,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_F] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_C] = 8000.0000
charge_G[G5,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_F] = 1000.0000

```

```

charge_S[S1,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_D] = 5000.0000
charge_S[S1,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_F] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_D] = 2000.0000
charge_S[S2,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_F] = 1000.0000
charge_S[S3,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_E] = 1000.0000
charge_S[S3,tableaux_F] = 3000.0000
charge_S[S4,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_C] = 3000.0000
charge_S[S4,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_E] = 2000.0000
charge_S[S4,tableaux_F] = 1000.0000
charge_S[S5,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_S[S5,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_T[T1,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T3,tableaux_A] = 1000.0000
charge_T[T3,tableaux_B] = 3000.0000

```

```

charge_T[T3,tableaux_C] = 5000.0000
charge_T[T3,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T3,tableaux_E] = 3000.0000
charge_T[T3,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_F] = 0.0000

charge_AS[AS1,tableaux_A] = 0.0000
charge_AS[AS1,tableaux_B] = 0.0000
charge_AS[AS1,tableaux_C] = 5000.0000
charge_AS[AS1,tableaux_D] = 0.0000
charge_AS[AS1,tableaux_E] = 3000.0000
charge_AS[AS1,tableaux_F] = 4000.0000
charge_AS[AS2,tableaux_A] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_B] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_C] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_D] = 7000.0000
charge_AS[AS2,tableaux_E] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_F] = 1000.0000

charge_AT[AT1,tableaux_A] = 1000.0000
charge_AT[AT1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_AT[AT1,tableaux_C] = 1000.0000
charge_AT[AT1,tableaux_D] = 0.0000
charge_AT[AT1,tableaux_E] = 0.0000
charge_AT[AT1,tableaux_F] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_A] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_B] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_C] = 4000.0000
charge_AT[AT2,tableaux_D] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_E] = 3000.0000
charge_AT[AT2,tableaux_F] = 0.0000

charge_BS[BS,tableaux_A] = 0.0000
charge_BS[BS,tableaux_B] = 0.0000
charge_BS[BS,tableaux_C] = 5000.0000
charge_BS[BS,tableaux_D] = 7000.0000
charge_BS[BS,tableaux_E] = 3000.0000
charge_BS[BS,tableaux_F] = 5000.0000

charge_BT[BT,tableaux_A] = 1000.0000
charge_BT[BT,tableaux_B] = 3000.0000

```

```

charge_BT[BT,tableaux_C] = 5000.0000
charge_BT[BT,tableaux_D] = 0.0000
charge_BT[BT,tableaux_E] = 3000.0000
charge_BT[BT,tableaux_F] = 0.0000

charge_B[B1,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_B[B1,tableaux_C] = 1000.0000
charge_B[B1,tableaux_D] = 0.0000
charge_B[B1,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B1,tableaux_F] = 6000.0000
charge_B[B2,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_C] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_D] = 7000.0000
charge_B[B2,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_F] = 2000.0000
charge_B[B3,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_C] = 2000.0000
charge_B[B3,tableaux_D] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_F] = 1000.0000
charge_B[B4,tableaux_A] = 3000.0000
charge_B[B4,tableaux_B] = 3000.0000
charge_B[B4,tableaux_C] = 7000.0000
charge_B[B4,tableaux_D] = 3000.0000
charge_B[B4,tableaux_E] = 9000.0000
charge_B[B4,tableaux_F] = 5000.0000
charge_B[B5,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B5,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_B[B5,tableaux_D] = 4000.0000
charge_B[B5,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B5,tableaux_F] = 1000.0000
charge_B[B6,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_C] = 8000.0000
charge_B[B6,tableaux_D] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_F] = 0.0000

```



### 3) Results: Plan de planification d'un réseau avec un contrôle de la qualité caractérisé par des inspections qui minimisent les coûts.

=====

Optimal Solution with Objective Value: 2889491.9000

flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_B] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_D] = 7000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_B] = 1000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C2,tableaux\_F] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C3,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C4,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C5,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G1,C6,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C2,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C3,tableaux\_F] = 6000.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_D] = 0.0000

flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C4,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C5,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G2,C6,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C2,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_E] = 1000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C3,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C4,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_A] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_C] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_E] = 2000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C5,tableaux\_F] = 1000.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G3,C6,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_C] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_D] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_E] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C1,tableaux\_F] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C2,tableaux\_A] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C2,tableaux\_B] = 0.0000  
 flux\_G\_C[G4,C2,tableaux\_C] = 0.0000





[illegible]

```

flux_T_C[T3,C3,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T3,C3,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T3,C3,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T3,C3,tableaux_E] = 1000.0000
flux_T_C[T3,C3,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T3,C4,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T3,C4,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T3,C4,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T3,C4,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T3,C4,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T3,C4,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T3,C5,tableaux_A] = 1000.0000
flux_T_C[T3,C5,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T3,C5,tableaux_C] = 2000.0000
flux_T_C[T3,C5,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T3,C5,tableaux_E] = 2000.0000
flux_T_C[T3,C5,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T3,C6,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T3,C6,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T3,C6,tableaux_C] = 3000.0000
flux_T_C[T3,C6,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T3,C6,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T3,C6,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T4,C1,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T4,C1,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T4,C1,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T4,C1,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T4,C1,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T4,C1,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T4,C2,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T4,C2,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T4,C2,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T4,C2,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T4,C2,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T4,C2,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T4,C3,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T4,C3,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T4,C3,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T4,C3,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T4,C3,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T4,C3,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T4,C4,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T4,C4,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T4,C4,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T4,C4,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T4,C4,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T4,C4,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T4,C5,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T4,C5,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T4,C5,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T4,C5,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T4,C5,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T4,C5,tableaux_F] = 0.0000
flux_T_C[T4,C6,tableaux_A] = 0.0000
flux_T_C[T4,C6,tableaux_B] = 0.0000
flux_T_C[T4,C6,tableaux_C] = 0.0000
flux_T_C[T4,C6,tableaux_D] = 0.0000
flux_T_C[T4,C6,tableaux_E] = 0.0000
flux_T_C[T4,C6,tableaux_F] = 0.0000

```

```
flux_AS_S[AS1,S1,tableaux_A] = 0.0000
flux_AS_S[AS1,S1,tableaux_B] = 0.0000
flux_AS_S[AS1,S1,tableaux_C] = 0.0000
flux_AS_S[AS1,S1,tableaux_D] = 0.0000
flux_AS_S[AS1,S1,tableaux_E] = 0.0000
flux_AS_S[AS1,S1,tableaux_F] = 0.0000
```







```

flux_B_G[B6,G3,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_C] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G3,tableaux_F] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_C] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G4,tableaux_F] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_A] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_B] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_C] = 8000.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_D] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_E] = 0.0000
flux_B_G[B6,G5,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_C[C1,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_B] = 2000.0000
charge_C[C1,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_D] = 7000.0000
charge_C[C1,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C1,tableaux_F] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_B] = 1000.0000
charge_C[C2,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C2,tableaux_F] = 1000.0000
charge_C[C3,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C3,tableaux_E] = 1000.0000
charge_C[C3,tableaux_F] = 3000.0000
charge_C[C4,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_C] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C4,tableaux_F] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_A] = 1000.0000
charge_C[C5,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_C[C5,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C5,tableaux_E] = 2000.0000
charge_C[C5,tableaux_F] = 1000.0000
charge_C[C6,tableaux_A] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_B] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_C] = 3000.0000
charge_C[C6,tableaux_D] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_E] = 0.0000
charge_C[C6,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_G[G1,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_G[G1,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_D] = 7000.0000
charge_G[G1,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G1,tableaux_F] = 2000.0000
charge_G[G2,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_D] = 0.0000

```

```

charge_G[G2,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G2,tableaux_F] = 6000.0000
charge_G[G3,tableaux_A] = 2000.0000
charge_G[G3,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_C] = 2000.0000
charge_G[G3,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G3,tableaux_E] = 3000.0000
charge_G[G3,tableaux_F] = 1000.0000
charge_G[G4,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_C] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G4,tableaux_F] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_A] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_B] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_C] = 8000.0000
charge_G[G5,tableaux_D] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_E] = 0.0000
charge_G[G5,tableaux_F] = 1000.0000

```

```

charge_S[S1,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_D] = 5000.0000
charge_S[S1,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S1,tableaux_F] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_D] = 2000.0000
charge_S[S2,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S2,tableaux_F] = 1000.0000
charge_S[S3,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_C] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S3,tableaux_E] = 1000.0000
charge_S[S3,tableaux_F] = 3000.0000
charge_S[S4,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_C] = 3000.0000
charge_S[S4,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S4,tableaux_E] = 2000.0000
charge_S[S4,tableaux_F] = 1000.0000
charge_S[S5,tableaux_A] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_B] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_S[S5,tableaux_D] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_E] = 0.0000
charge_S[S5,tableaux_F] = 0.0000

```

```

charge_T[T1,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T1,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T2,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T3,tableaux_A] = 1000.0000
charge_T[T3,tableaux_B] = 3000.0000

```



```

charge_T[T3,tableaux_C] = 5000.0000
charge_T[T3,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T3,tableaux_E] = 3000.0000
charge_T[T3,tableaux_F] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_A] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_B] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_C] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_D] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_E] = 0.0000
charge_T[T4,tableaux_F] = 0.0000

charge_AS[AS1,tableaux_A] = 0.0000
charge_AS[AS1,tableaux_B] = 0.0000
charge_AS[AS1,tableaux_C] = 5000.0000
charge_AS[AS1,tableaux_D] = 0.0000
charge_AS[AS1,tableaux_E] = 2000.0000
charge_AS[AS1,tableaux_F] = 1000.0000
charge_AS[AS2,tableaux_A] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_B] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_C] = 0.0000
charge_AS[AS2,tableaux_D] = 7000.0000
charge_AS[AS2,tableaux_E] = 1000.0000
charge_AS[AS2,tableaux_F] = 4000.0000

charge_AT[AT1,tableaux_A] = 1000.0000
charge_AT[AT1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_AT[AT1,tableaux_C] = 0.0000
charge_AT[AT1,tableaux_D] = 0.0000
charge_AT[AT1,tableaux_E] = 1000.0000
charge_AT[AT1,tableaux_F] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_A] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_B] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_C] = 5000.0000
charge_AT[AT2,tableaux_D] = 0.0000
charge_AT[AT2,tableaux_E] = 2000.0000
charge_AT[AT2,tableaux_F] = 0.0000

charge_BS[BS,tableaux_A] = 0.0000
charge_BS[BS,tableaux_B] = 0.0000
charge_BS[BS,tableaux_C] = 5000.0000
charge_BS[BS,tableaux_D] = 7000.0000
charge_BS[BS,tableaux_E] = 3000.0000
charge_BS[BS,tableaux_F] = 5000.0000

charge_BT[BT,tableaux_A] = 1000.0000
charge_BT[BT,tableaux_B] = 3000.0000

```

```

charge_BT[BT,tableaux_C] = 5000.0000
charge_BT[BT,tableaux_D] = 0.0000
charge_BT[BT,tableaux_E] = 3000.0000
charge_BT[BT,tableaux_F] = 0.0000

charge_B[B1,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B1,tableaux_B] = 3000.0000
charge_B[B1,tableaux_C] = 1000.0000
charge_B[B1,tableaux_D] = 0.0000
charge_B[B1,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B1,tableaux_F] = 6000.0000
charge_B[B2,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_C] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_D] = 7000.0000
charge_B[B2,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B2,tableaux_F] = 2000.0000
charge_B[B3,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_C] = 2000.0000
charge_B[B3,tableaux_D] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B3,tableaux_F] = 1000.0000
charge_B[B4,tableaux_A] = 3000.0000
charge_B[B4,tableaux_B] = 3000.0000
charge_B[B4,tableaux_C] = 7000.0000
charge_B[B4,tableaux_D] = 3000.0000
charge_B[B4,tableaux_E] = 9000.0000
charge_B[B4,tableaux_F] = 5000.0000
charge_B[B5,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B5,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B5,tableaux_C] = 2000.0000
charge_B[B5,tableaux_D] = 4000.0000
charge_B[B5,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B5,tableaux_F] = 1000.0000
charge_B[B6,tableaux_A] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_B] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_C] = 8000.0000
charge_B[B6,tableaux_D] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_E] = 0.0000
charge_B[B6,tableaux_F] = 0.0000

```

## **ANNEXE 5**

### **VALEURS DE CHAQUE ESSAIS DES PLANS D'EXPÉRIMENTATION**

## BIBLIOGRAPHIE

Akinc, U. (1993). Selecting a set of vendors in a manufacturing environment. *Journal of Operations Management*, 11(2), 107-122.

Arntzen, Bruce C., Gerald G. Brown, Terry P. Harrison, et Linda L. Trafton, 1995. *Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation*, INTERFACES, 25: 69-93.

Law, A. M., et Kelton W., D. (1991). *Simulation modeling and analysis* (2nd ed.). New York, N.Y.: McGraw-Hill.

Banker, R. D. and Khosla, I. S. (1995). Economics of operations management: A research perspective. *Journal of Operations Management*, 12, 423-425.

Baillargeon, G. (1995). *Plans d'échantillonnage en contrôle de la qualité contrôle par attributs* 4e éd. Trois-Rivières: Éditions SMG.

Beamon, B. M., et Chen, V. C. P. (2001). Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research*, 39(14), 3195-3218.

Beachamp, Y., (1995), Contrôle statistique de la qualité des biens, Note de cours, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada

Besterfield, D. H. (2001). *Quality control*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

Cahill, G., Gopal, C. (1992). *Logistics in Manufacturing*. Irwin Professional Publishing, Chicago, IL, 82.

Camm, Jeffrey D., Thomas E. Chorman, Franz A. Dull, James R. Evans, Dennis J. Sweeney, and Glenn W. Wegryn, 1997. Blending OR/MS, Judgement, and GIS: Restructuring PetG.s Supply Chain, *INTERFACES*, 27(1): 128-142.

Cohen, M. A., et Lee, H. L. (1988). Strategic Analysis of integrated production-distribution systems: Models and Methods. *Operations Research*, 36(2), 216-228.

Cohen, M. A., et Moon, S. (1991). Integrated plant loading model with economies of scale and scope. *European Journal of Operational Research*, 50(3), 266-279.

Cyrus, A. M, (1964), *The cost Breakevent Point in Attribute Sampling*, Industrial Quality Control, septembre 1964, 137-144

D'Amours, S., Lefrancois, P., Montreuil, B., et Ramudhin, A. (1993). Unquality-costing sampling plans by variables and their implications on supply relationships. *International Journal of Production Economics*, 32(3), 315-326.

- D'Amours, S., Montreuil, B., et Soumis, F. (1997). Price-based planning and scheduling of multiproduct orders in symbiotic manufacturing networks. *European Journal of Operational Research*, 96(1), 148-166.
- D'Amours, S., Montreuil, B., Lefrancois, P., et Soumis, F. (1999). Networked manufacturing: The impact of information sharing. *International Journal of Production Economics*, 58(1), 63-79.
- Dayton, J.D., (1977), *Fine Tuning Inspection for Minimum Cost*, Quality, Novembre, 46-99.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Dickson, G. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions, *Journal of Purchasing*, Vol. 2, 28-41.
- Dodge, H. F., et Romig, H. G. (1959). *Sampling inspection tables single and double sampling* (2nd ed.). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.
- Garneau, D., Youssef, A.Y. (1995). Programme de certification des fournisseurs : Une approche en approvisionnement. Colloque de Qualité dans Lanaudière, Lanaudière, Canada.
- Gershwin, S. B. (2002). *Manufacturing systems engineering*. Cambridge, Mass.: Stanley B. Gershwin.
- Gharbi, A., et Kenne, J. P. (1999). Experimental approach control for unreliable manufacturing systems. Paper presented at the Proceedings of the 1999 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'99), Oct 18-Oct 21 1999, Barcelona, Spain.
- Goetschalckx, M., Vidal, C. J., et Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 1-18.
- Gould F.J., Eppen, G.D., Schmidt C.P. (1991). *Introduction management science*. 3<sup>e</sup> ed. Prentice Hall. New Jersey.
- Hillier, F. S., and G.J. Lieberman, (1990). *Introduction to Operation Research*. 5<sup>e</sup> ed. Sans Franscisco, Holden Day, 1990.
- Hisham, S., (1998). A Multi-Objectif Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain, *Division of Research and Advanced Studies*, University of Cincinnati
- Hurtubise, S., Olivier, C., Gharbi, A., 2000, *Conceptual framework for management of manufacturing networks*. Proceedings of the POM 2000 World Conference on Production and Operations Management, Sevilla, Spain.

- Hurtubise, S., 2001, *Contribution au développement d'outils de planification de production dans un contexte de systèmes manufacturiers agiles pour la conception de chaînes d'approvisionnement*, Mémoire de maîtrise. Montréal, QC, Canada: École de technologie supérieure, Université du Québec.
- Ishii, K., Takahashi, K., et Muramatsu, R. (1988). Integrated production, inventory and distribution systems. *International Journal of Production Research*, 26(3), 473-482.
- Juran, J. M., et Gryna, F. M. (2001). *Quality planning and analysis from product development through use* (4th ed.). New York, N.Y.: McGraw-Hill.
- Kauffmann, P. J. J., et Cockrell, C. E. (1996). Strategic management of receipt inspection. *Production and Inventory Management Journal*, 37(3), 47-51.
- Krajewski, W. F., et Krajewski, K. L. (1989). Real-time quality control of streamflow data - a simulation study. *Water Resources Bulletin*, 25(2), 391-399.
- Mangiameli, Paul, Roethlein, Christopher J. (2001). An examination of quality performance at different levels in a connected supply chain: a preliminary case study. *Integrated Manufacturing Systems*, 12 (2).
- Martel, A. (2003). Planning Policies for Multi-Echelon Supply Systems with Probabilistic Time-Varying Demands, *INFOR*, 41(1), 71-91.
- Miles, Raymond E. and Snow, Charles C. (1978). *Organizational strategy, structure, and process*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Miller, J. G. (1981). Production/operations management: Agenda for the 80s. *Decision Sciences*, 12, 547-571.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and analysis of experiments* (5th ed.). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.
- Montreuil, B., Frayret, J.-M., et D'Amours, S. (2000). Strategic framework for networked manufacturing. *Computers in Industry*, 42(2), 299-317.
- Nahmias, S. (2001). *Production and operations analysis* (4th ed.). Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- Olivier, C., (1998): *Méthodologie d'évaluation des aménagements d'usines organisées en réseaux de processeurs agiles*, Thèse de doctorat non publiée, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Ste-Foy, Québec.
- Pritsker, A. A. B., O'Reilly, J. J. (1999). *Simulation with Visual SLAM and AweSim* (2nd ed.). New York, N.Y.
- Pyke, David F., Morris A. Cohen (1993). Performance Characteristics of Stochastic Integrated Production-Distribution Systems, *European Journal of Operational Research*, 68(1), 23-48.

Rioux, M., (2001). *Méthodologie d'expérimentation et de modélisation empirique appliquée à l'optimisation des stocks intermédiaires de systèmes de production*, Mémoire de maîtrise. Montréal, QC, Canada: École de technologie supérieure, Université du Québec.

Sabri, E.H. (1998). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. Thèse de doctorat, UNIVERSITY OF CINCINNATI.

Schilling, E. G. (1982). *Acceptance sampling in quality control*. New York Milwaukee, Wisc.: M. Dekker.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., et Simchi-Levi, E. (2000). *Designing and managing the supply chain concepts, strategies, and case studies*. Boston, Mass.: McGraw-Hill.

Thomas, D. J., et Griffin, P. M. (1996). Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94(1), 1-15.

Tracey, M. (2003). *An Empirical Study of the Interaction Among Inbound and Outbound Transportation, Delivery Service, and Manufacturing Firm Performance*, Proceedings of the 14th Annual North American Research/Teaching Symposium on Purchasing and Supply Chain Management, Tempe, AZ, March 20-22, 550-568.

Verma, R., Pullman, M.E. (1998). An Analysis of the Supplier Selection Process, *Omega: The International Journal of Management Science*, 26 (6), 739-750.

Vollmann, T. E., et Cordon, C. (1998). Building successful customer - supplier alliances. *Long Range Planning*, 31(5), 684-694.

Wonnacott, T. H., et Wonnacott, R. J. (1990). *Introductory statistics for business and economics* (4th ed.). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.

Weber, C., A., et Current, J., R. (1993). Multiobjective approach to vendor selection. *European Journal of Operational Research*, 68(2), 173-184.

Williams, J.F. (1981). Heuristic Techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: theory and empirical comparisons. *Management Science* 27 (3) 336-352.

Youssef, A.Y., (1995), *Gestion de la qualité*, Note de cours, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada

Zhou, Z., Cheng, S., et Hua, B. (2000). Supply chain optimization of continuous process industries with sustainability considerations. *Computers and Chemical Engineering 7th International Symposium on Process Systems Engineering*, Jul 16-Jul 21 2000, 24(2), 1151-1158.